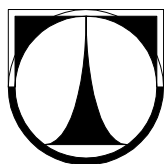


**TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**

Fakulta mechatroniky a mezioborových inženýrských studií



## **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

Liberec 2007

**Michal Janoušek**

# **TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**

Fakulta mechatroniky a mezioborových inženýrských studií

Studijní program: M 2612 – Elektrotechnika a informatika

Studijní obor: 3906T001 – Mechatronika

## **Experimentální výzkum nestacionárních proudových polí tkacích trysek**

## **Experimental research of unsteady flow fields of weaving nozzles**

### **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

Autor: **Michal Janoušek**

Vedoucí práce: Prof. Ing. Václav Kopecký, CSc

Konzultant: Ing. Michal Kotek

Zadání práce

# Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 o právu autorském, zejména § 60 (školní dílo).

Beru na vědomí, že TUL má právo na uzavření licenční smlouvy o užití mé diplomové práce a prohlašuji, že **s o u h l a s í m** s případným užitím mé diplomové práce (prodej, zapůjčení apod.).

Jsem si vědom toho, že užít své diplomové práce či poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem TUL, která má právo ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, vynaložených univerzitou na vytvoření díla (až do jejich skutečné výše).

Diplomovou práci jsem vypracoval(a) samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

V Liberci 18. května 2007

.....

Michal Janoušek

# Poděkování

Rád bych na tomto místě poděkoval Prof. Ing. Václavu Kopeckému, CSc. za vedení mé diplomové práce, věcné připomínky a cenné rady. Rovněž děkuji konzultantovi Ing. Michalovi Kotkovi za jeho odbornou pomoc, četné konzultace a rady pro zpracovávání a prezentaci naměřených dat. Rád bych také touto formou poděkoval Ing. Lucii Pírkové za asistenci při měření a Ing. Davidovi Albrechtovi za iniciativu ohledně simulace modelu trysky a rady spojenými s mechanikou tekutin.

# Abstrakt

Diplomová práce se zabývá experimentálním výzkumem nestacionárních proudových polí tkacích trysek. Pro měření je využita moderní anemometrická metoda PIV (Partical Image Velocimetry) a okrajově také LDA (Laser Doppler Anemometry). Pro možnost porovnání naměřených dat byly provedeny simulace v prostředí Fluent.

Na základě naměřených dat je podrobně popsáno chování proudu ve stacionárním režimu a také vznik, vývoj a charakter proudu v pulzním režimu (rozběh, ustálení, doznívání). Práce se také zabývá experimentem při zachycení letícího útku a stanovením rychlosti jeho pohybu.

**Klíčová slova:** tkací tryška, proudová pole, LDA, PIV,

# Abstract

The main aim of diploma thesis is experimental jet flow research behind industrial weaving nozzle pneumatic weaving machinery. Study is based on modern PIV method (Particle Image Velocimetry). Results of these measurements help to understand needs of weaving nozzle construction, supply of compressed air and timing of control elements. In document is described full measuring system, its experimental disposition and device synchronizing procedure with solenoid valve. Thesis specifies data acquisition and processing. Results are presented also via graphic form and document behaviour of jet flow behind weaving nozzle throughout whole working cycle (start, standstill, and tail).

**Keywords:** weaving nozzle research, jet flow, LDA, PIV

# Obsah

♦ KAPITOLA 0 .....	10
ÚVOD .....	10
♦ KAPITOLA 1 .....	11
1.1 METODA LDA.....	11
1.1.1 Základní principy metody LDA.....	12
1.2 METODA PIV .....	14
1.2.1 Záznam PIV obrazů .....	14
1.2.2 Metody zpracování PIV záznamů .....	15
1.2.3 Systematické chyby a omezení metody PIV .....	17
1.2.4 Způsoby analýzy naměřených dat.....	19
1.3 VZDUCHOVÝ PROHOZ TKACÍCH STROJŮ .....	21
1.3.1 Tkací stroje s pneumatickým prohozem útku.....	22
♦ KAPITOLA 2 .....	23
2.1 POPIS EXPERIMENTU .....	23
2.1.1 Tkací tryska .....	23
2.1.2 Elektromagnetický ventil, spínací obvod.....	25
2.1.3 Synchronizace solenoidu s měřicím zařízením.....	26
2.1.4 PIV měřicí systém .....	28
♦ KAPITOLA 3 .....	31
3.1 MĚŘENÍ.....	31
3.1.1 Zpracování naměřených dat z PIV .....	32
3.2 VÝSLEDKY MĚŘENÍ .....	35
3.2.1 Pulzní režim trysky (tryska 2,5 mm, přetlak 0,4 MPa) .....	35
3.2.2 Kontinuální režim trysky.....	41
3.2.3 Porovnání trysek v kontinuálním a pulzním režimu .....	45
3.3 DOPLŇUJÍCÍ MĚŘENÍ .....	46
3.3.1 Výsledky měření LDA .....	46
3.3.2 BSA Flow software .....	49
3.3.3 Výsledky simulací FLUENT.....	50
3.3.4 Měření rychlosti útku.....	53
♦ KAPITOLA 4 .....	56
ZÁVĚR.....	56

# Seznam obrázků

Obr. 1 Měření rychlosti proudu vzduchu u ústí tkací trysky s využitím LDA .....	11
Obr. 2 Princip metody LDA .....	12
Obr. 3 Schematické rozložení prvků PIV metody [6] .....	15
Obr. 4 Rozdělení získaného obrazu na vyhodnocované oblasti .....	16
Obr. 5 Grafická podoba korelační mapy (vzájemná korelace) [6] .....	16
Obr. 6 Ukázka vektorové mapy .....	17
Obr. 7 Uspořádání částí tkacího stroje .....	21
Obr. 8 Princip tryskového prohozu .....	22
Obr. 9 Sestava trysky, nosné části, solenoidů a vzduchotechniky .....	23
Obr. 10 Rozložená sestava trysky.....	24
Obr. 11 Tryska s ejektorem .....	24
Obr. 12 Ejektory trysek 2,5 a 3 mm .....	24
Obr. 13 Nastínění geometrie součástí tkací trysky .....	24
Obr. 14 Elektrický obvod pro spínání solenoidu .....	25
Obr. 15 Rozbor časové synchronizace experimentu .....	26
Obr. 16 Synchronizace ventilu se zpožděním 110 ms.....	27
Obr. 17 Syčení částicemi pomocí ejektoru .....	29
Obr. 18 Syčení částicemi sloučením proudů před tryskou .....	29
Obr. 19 Zpracování dat PIV – záznam obrazu .....	32
Obr. 20 Zpracování dat PIV – vektorová mapa vzájemné korelace.....	33
Obr. 21 Zpracování dat PIV – Range validace.....	33
Obr. 22 Zpracování dat PIV – validace klouzavým průměrem.....	34
Obr. 23 Zpracování dat PIV – vektorová statistika .....	34
Obr. 24 Pulzní režim, skalární mapa, $t=15,0$ ms, $v_{\max}=18,5$ m/s.....	35
Obr. 25 Pulzní režim, skalární mapa, $t=15,4$ ms, $v_{\max}=32,4$ m/s.....	35
Obr. 26 Pulzní režim, skalární mapa, $t=16,2$ ms, $v_{\max}=60,2$ m/s.....	35
Obr. 27 Pulzní režim, skalární mapa, $t=16,8$ ms, $v_{\max}=131$ m/s.....	35
Obr. 28 Pulzní režim, skalární mapa, $t=17,4$ ms, $v_{\max}=182$ m/s.....	36
Obr. 29 Pulzní režim, skalární mapa, $t=18,2$ ms, $v_{\max}=315$ m/s.....	36
Obr. 30 Pulzní režim, skalární mapa, $t=42,0$ ms, $v_{\max}=349$ m/s.....	36



Obr. 31 Pulzní režim, skalární mapa, $t=82,0$ ms, $v_{\max}=233$ m/s.....	36
Obr. 32 Pulzní režim, skalární mapa, $t=87,0$ ms, $v_{\max}=100$ m/s.....	36
Obr. 33 Pulzní režim, skalární mapa, $t=117$ ms, $v_{\max}=4,4$ m/s.....	37
Obr. 34 Pulzní režim, skalární mapa, $t=125$ ms, $v_{\max}=1,2$ m/s.....	37
Obr. 35 Pulzní režim – vývoj rychlosti proudu v čase (4mm od ústí trysky).....	38
Obr. 36 Pulzní režim – vývoj proudu (vektorové mapy).....	39
Obr. 37 Pulzní režim – ustálení a doznívání proudu (vektorové mapy).....	39
Obr. 38 Pulzní režim - vývoj proudu (mapy vířivostí).....	40
Obr. 39 Kontinuální režim - skalární mapy rychlostí proudu.....	41
Obr. 40 Kontinuální režim - vektorové mapy.....	42
Obr. 41 Kontinuální režim – výskyt drobných vírů.....	42
Obr. 42 Pokles rychlosti v podélné ose trysky v závislosti na vzdálenosti od ústí trysky ..	43
Obr. 43 Rychlostní profil proudu vzduchu – 4 mm od ústí trysky ..	44
Obr. 44 Rychlostní profil proudu vzduchu – 48 mm od ústí trysky ..	44
Obr. 45 Porovnání rychlostních profilů v kontinuálním a pulzním režimu.....	45
Obr. 46 Porovnání shodnosti proudových profilů (výřez).....	45
Obr. 47 Sestava pro LDA .....	46
Obr. 48 Rychlostní spektrum proudu s využitím LDA-BSA Flow software .....	49
Obr. 49 Fluent - Průběh rychlostí v ústí 2,5 mm trysky, přírodní tlak 0,5 MPa [8] .....	50
Obr. 50 Fluent - Průběh rychlostí v ústí 2,5mm trysky, přírodní tlak 0,7 MPa[8] .....	51
Obr. 51 Fluent – Průběh rychlosti uvnitř 2,5mm trysky v ústí ejektoru, 0,7 MPa [8] .....	52
Obr. 52 Bezčásticová oblast uvnitř proudu .....	52
Obr. 53 Detail vláken zaznamenané nitě - vybrání vhodných pixelů pro určení rychlosti .	53
Obr. 54 Korelace pořízeného obrazu s útkem .....	55
Obr. 55 Skalární mapa rychlostí letu útkové nitě .....	55

# Seznam zkratek

Značka	Rozměr	Význam
$d$	[s]	posunutí signálu
$f$	[Hz]	frekvence
$f(k,l)$		funkce hodnot jasu v obraze
$K$		1. koeficient validace korelace
$k$		koeficient průměrové validace
$l_m, d_m, h_m$	[mm]	rozměry optické sondy
$L$		2. koeficient validace korelace
$l_{obl}$	[m]	délka vyhodnocované oblasti
$M$		zvětšení obraz/objekt
$m, n$		indexy složek
$R$		vrcholy v korelační rovině
$S$		vektor posunutí v korelační rovině
$s$	[s]	délka trvání synchronizačního sig.
$v$	[m/s]	okamžitá rychlost proudu
$v_{max}$	[m/s]	maximální rychlost v oblasti
$\Delta x$		posunutí v ose x
$\Delta y$		posunutí v ose y
$\Delta l$	[m]	posunutí mezi expozicemi
$\Delta t$	[s]	doba mezi expozicemi obrazu
$\Delta T$	[s]	zpoždění v modulátoru
$\lambda$	[m]	vlnová délka
$\Phi_{fg}(m, n)$		vzájemná korelační funkce

Zkratka	Význam
FFT	Fast Fourier Transform, rychlá Fourierova transformace
LDA	Laser Doppler Anemometry, laserová Dopplerovská anemometrie
PDA	Particle Dynamics Analysis
PIV	Particle Image Velocimetry

## ◆ Kapitola 0

### Úvod

I přes velký rozmach různých modelovacích technik v oboru mechaniky tekutin zůstávají nenahraditelným zdrojem informací experimentální výzkumy. Matematicko-fyzikální model operuje často se zjednodušenými podmínkami a tudíž je třeba upravovat a ověřovat tento model ve spolupráci s naměřenými daty realizovaného experimentu.

Pro výzkum jsou důležitou skupinou bezkontaktní metody měření. Výhodou je neovlivnění naměřených dat přítomností určitého měřicího objektu v proudu tekutiny. Zřejmě nejdéle využívanou moderní bezkontaktní technikou pro výzkum proudění tekutin je metoda LDA (Laser Doppler Anemometry). Metoda je vhodná pro studium stacionárního proudění (což vyplývá z nutnosti měřit bod po bodu), umožňuje vynikající prostorové rozlišení díky malé měřicí sondě. Ovšem rychlý rozvoj výpočetní techniky umožňuje vznik i nových měřicích metod. Jednou z těchto moderních měřicích metod je i metoda PIV (Particle Image Velocimetry), umožňující bezkontaktní výzkum stacionárních i nestacionárních proudových polí.

Vhodným příkladem nestacionárního děje je vzduchový prohoz moderních tryskových tkacích strojů. Proud za ústím hlavní tkací trysky je charakterizován malými příčnými rozměry (řádově mm), má vysoké gradienty nárůstu rychlosti, kdy v několika milisekundách se rychlost proudu zvyšuje od nulových hodnot až k podzvukovým rychlostem. Pro optimalizaci provozních parametrů a tím tedy i ke zvýšení efektivity tkaní a snížení nákladů spojených s procesem výroby textilií je nutné pochopit popsání procesy uvnitř prohozního kanálu.

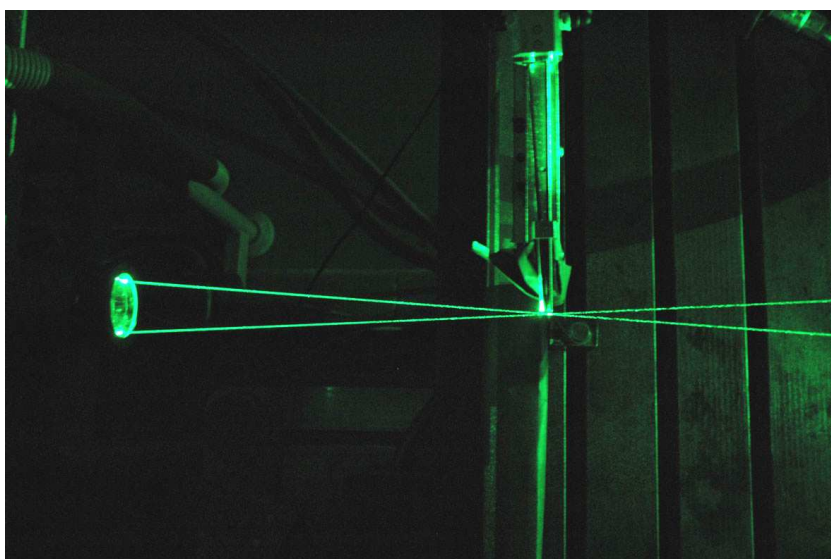
V této práci je navržen a popsán experiment pro měření proudových polí pomocí metody PIV i LDA. Dále je popsán postup při synchronizaci měřicího systému s elektromagnetickým ventilem. V experimentální části je popsáno měření ve stacionárním a nestacionárním režimu. Dokument také obsahuje detailní popis zpracování naměřených dat. Na základě zpracovaných výsledků je proud vzduchu podrobně popsán v obou zkoumaných režimech. Z předešlých provedených měření se očekává dosažení těsně podzvukových hodnot rychlostí proudu vzduchu u ústí trysky.

## ◆ Kapitola 1

Pro experimentální výzkum proudění tekutin se v posledních letech úspěšně používají metody laserové anemometrie. Jedná se o bezkontaktní měřicí metody, které neovlivňují zkoumaný předmět. V následujících podkapitolách jsou popsány dvě z těchto metod, které byly využity pro měření proudových polí v diplomové práci.

### 1.1 Metoda LDA

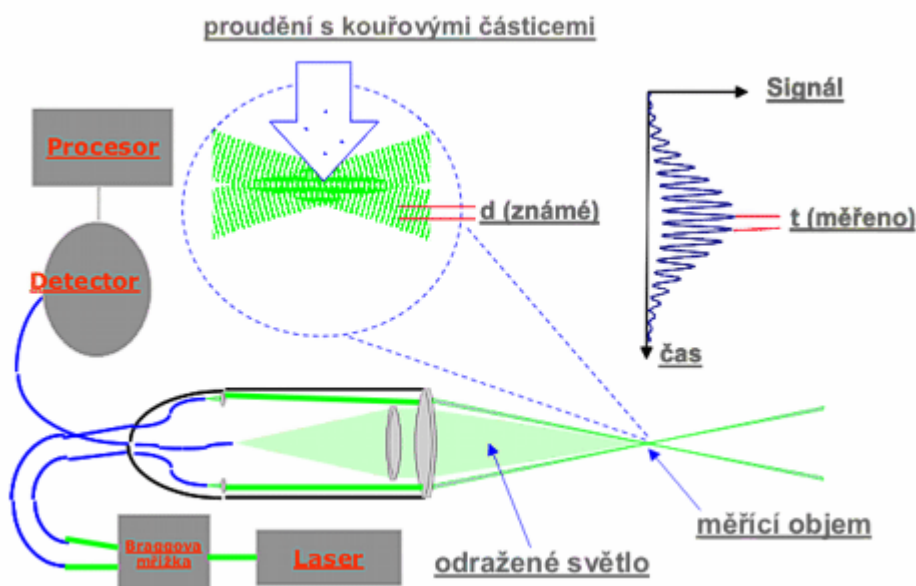
Laserová dopplerovská anemometrie je optická, bodová, bezkontaktní měřicí metoda určená k nepřímému měření rychlosti tekutin (měří se rychlost drobných částic rozptýlených v proudu zkoumané tekutiny). Tato technika je založena na Dopplerově jevu a patří mezi nejrozšířenější a nejpropracovanější anemometrická měření. Dopplerův jev popisuje změnu frekvence a vlnové délky světla rozptýleného na objektu, způsobenou nenulovou vzájemnou rychlostí vysílače a přijímače. Jev byl poprvé popsán Christianem Dopplerem již v roce 1842. Rozvoj této metody byl však možný až s výrazným pokrokem ve vývoji plynových laserů a s nárůstem výkonu výpočetní techniky. Jedním z nejznámějších příkladů pozorování Dopplerova jevu je změna frekvence zvuku projíždějícího automobilu okolo pozorovatele. Na základě tohoto jevu pracují i mnohá měřicí zařízení, např. radary pro měření rychlosti vozidel nebo lékařské fonografy.



Obr. 1 Měření rychlosti proudu vzduchu u ústí tkací trysky s využitím LDA

### 1.1.1 Základní principy metody LDA

Jak už bylo řečeno, metoda LDA je založena na Dopplerově jevu. Metoda měří změnu frekvence laserového záření, které je rozptylováno částicemi unášenými proudící tekutinou. Schematický princip metody je na následujícím obrazu.



Obr. 2 Princip metody LDA

Laserové světlo rozptýlené částicí je frekvenčně posunuto o hodnotu  $\Delta\nu$  (dopplerovský posuv). Jestliže se směr dopadající světelné vlny ani směr detekce rozptýleného světla nemění, lze z dopplerovského posuvu určit složku rychlosti ve směru vektoru  $\mathbf{v}$ . Frekvence registrovaná detektorem se nazývá dopplerovská frekvence  $f_d$  a je dána vztahem:

$$f_d = \frac{2 \sin(\theta/2)}{\lambda} u, \quad (1)$$

kde:  $u$  ...složka vektoru rychlosti částice,  
 $\theta$  ...úhel protínajících se laserových paprsků (průsečík tvoří optickou sondu)  
 $\lambda$  ...vlnová délka laserového světla.

Vedle dopplerovské frekvence je dalším důležitým parametrem i velikost optické sondy. Rozměry optické sondy mohou být vypočteny z průměru fokusovaných laserových paprsků ( $d_e$ ) a úhlu mezi nimi ( $\theta$ ):

$$l_m = \frac{d_e}{\sin \frac{\theta}{2}}, \quad d_m = \frac{d_e}{\cos \frac{\theta}{2}}, \quad h_m = d_e, \quad (2)$$

kde:  $l_m$  ...délka optické sondy,  
 $d_m$  ... šířka optické sondy,  
 $h_m$  ... výška optické sondy.

Výše uvedené parametry je nutné zohlednit při výběru výstupního optického objektivu. Použije-li se ke zmenšení rozměrů optické sondy zkrácení ohniskové vzdálenosti objektivu, povede toto ke zvětšení dopplerovské frekvence a k možným limitům výpočetní techniky. Naopak, vyhoví-li se pouze těmto limitům výpočetní techniky, velikost optické sondy může být vzhledem k rozměrům zkoumaného předmětu nevyhovující (příliš velká).

## 1.2 Metoda PIV

Jedna z nejpropracovanějších experimentálních metod laserové anemometrie je nazývána PIV – Particle Image Velocimetry, pro lepší výstižnost je vhodnějším názvem rovinná laserová anemometrie<sup>1</sup>. Na rozdíl od jiných metod založených na bodovém měření proudového pole (např. LDA) metoda PIV umožňuje záznam části nebo celého proudového pole a je vhodná i pro výzkum nestacionárních dějů.

Princip této techniky spočívá v zaznamenávání posunutí malých částic, rozptýlených ve zkoumaném médiu, a následném vyhodnocování jejich pohybu. Částice jsou unášeny proudem a mění tím svoji polohu v čase. Při osvětlení několika krátkými laserovými impulsy, generovanými s definovaným časovým odstupem, se získá záznam na CCD snímací prvek digitální kamery. Dle jednoduché rovnice:

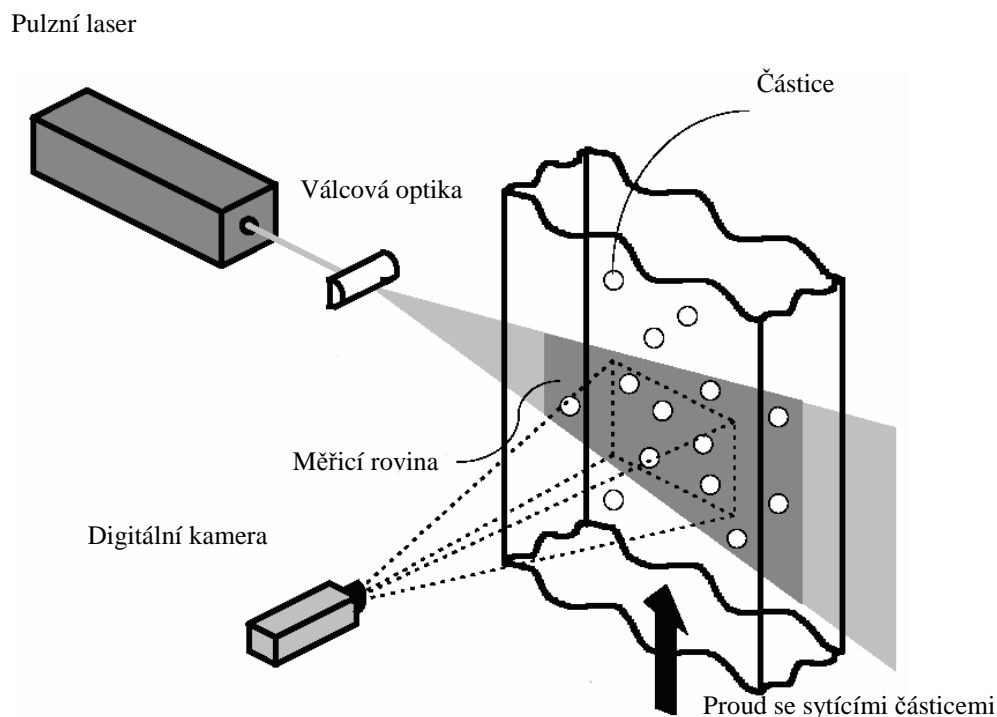
$$rychlost = \frac{posuv}{čas}, \quad (3)$$

kde *rychlost* pohybu je dána podílem *posuvu* částic a definovaným časovým intervalem snímání (*čas*). Z uvedeného postupu plyne potřeba dvou kroků: záznam pohybu částic a následná analýza získaných dat.

### 1.2.1 Záznam PIV obrazů

Principiální schéma systému je znázorněno na obr. 3. Laserový paprsek je formován válcovou optikou do laserového řezu, který osvětluje a zároveň definuje měřicí rovinu v proudovém poli. Částice obsažené v tekutině rozptylují laserové světlo do prostoru. Část rozptýleného světla proniká na maticový CCD detektor digitální kamery v podobě světlých skvrn na tmavém pozadí. Pro zaznamenání polohy částic v definovaném čase se s výhodou využívají pulzní lasery. Tímto se dosáhne krátkého osvětlení pro ostré zaznamenání okamžité polohy částic. Pro analýzu obrazu je nutné získat minimálně dva záznamy poloh částic s definovaným časovým rozestupem, tzn. určení počátečního a koncového stavu. Rozborem obrazů se získá vektorová mapa posunutí částic v tekutině ve zkoumané měřicí rovině (v laserovém řezu). Transformace mezi rovinami je dána zvětšením  $M = obraz/objekt$ .

<sup>1</sup> Dosud se ovšem neuchytil žádný český ekvivalent této metody, používá se pouze zkratka PIV.



Obr. 3 Schematické rozložení prvků PIV metody [6]

Pro záznam obrazů jsou možné dva způsoby:

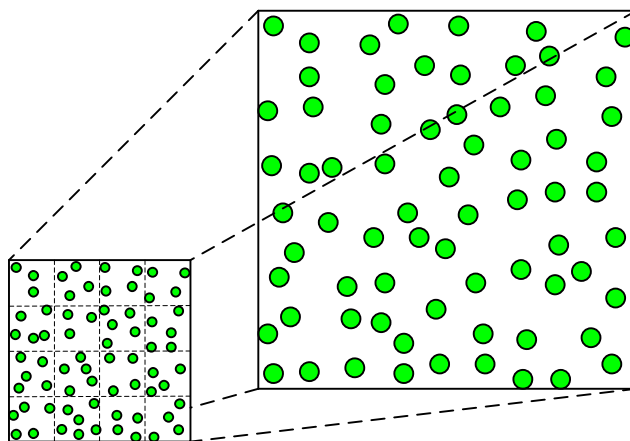
Jednotlivá expozice – každý záznam polohy částic z CCD snímače je uložen do samostatného obrazu. Na prvním záznamu je uložen počáteční stav částic, na druhém konečná poloha částic.

Dvojnásobná expozice – počáteční záznam i konečný záznam je exponován do stejného obrazu.

### 1.2.2 Metody zpracování PIV záznamů

Získaný obraz částic se rozdělí na množinu malých vyhodnocovaných oblastí (Obr.4). Následujícím úkolem je nalézt průměrné posunutí částic v dílčích oblastech. Při nepřítomnosti částic v některých z těchto oblastí se vnáší do experimentu nejistoty. Je tedy nutné zajistit vhodnou koncentraci částic v tekutině a následně i vybrat optimální vyhodnocovací algoritmus.



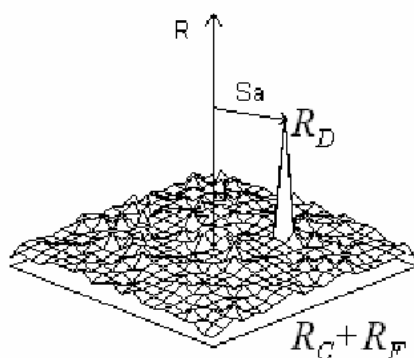


Obr. 4 Rozdělení získaného obrazu na vyhodnocované oblasti

Pro určení průměrného posunutí částic při aplikaci jednotlivé expozice (v případě dvou samostatných obrazů) se využívá vzájemná korelace. Vztah diskrétního výpočtu vzájemné korelace je ve tvaru:

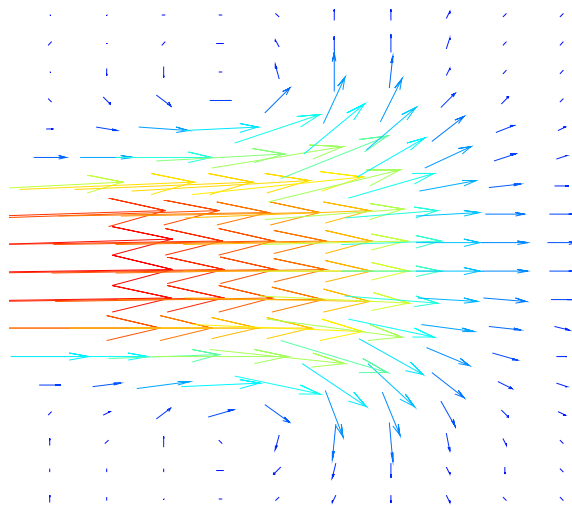
$$\phi_{fg}(m,n) = \sum_{k=-\infty}^{k=\infty} \sum_{l=-\infty}^{l=\infty} f(k,l) * g(k+m,l+n), \quad (4)$$

kde funkce  $f(k,l)$  vyjadřuje intenzitu světla ve vyhodnocovací oblasti zaznamenaného detektorem na pixelu s pozicí  $(k,l)$ . Funkční hodnota  $g(k+m,n+l)$  je rovna světelné intenzitě v téže oblasti v časovém posuvu  $t+\Delta t$ . Grafickým výsledkem vzájemné korelace je korelační mapa, která je znázorněna na obr. 5. Mapa zobrazuje charakteristický výsledek vzájemné korelace PIV obrazů ve vyhodnocované oblasti. Spojnice středu korelační roviny vyhodnocované oblasti  $R$  s vrcholem (peakem)  $R_D$  určuje vektor průměrného posunutí částic. Součet členů  $R_C + R_F$  charakterizuje korelační šum.



Obr. 5 Grafická podoba korelační mapy (vzájemná korelace) [6]

Zpracováním naměřených dat výše uvedeným způsobem lze vytvořit vektorovou mapu, zobrazující proudové pole tekutiny ve zkoumané oblasti (obr. 6).



Obr. 6 Ukázka vektorové mapy

### 1.2.3 Systematické chyby a omezení metody PIV

Jak již bylo řečeno, získaná vektorová mapa může velmi často obsahovat mnoho chybných vektorů. Toto může být způsobeno mnoha vlivy, např. vlivem ztracených párů, nevhodně zvoleným maximálním posuvem částic, odleskem laserového světla od okolního prostředí a nebo chybně zvolenou hustotou částic v tekutině. V níže uvedených kapitolách jsou tedy popsány nejzásadnější chyby a limity metody PIV

#### Chyba ztracených párů

Chyba ztracených párů se objevuje v případě, kdy během časového okamžiku, který odděluje první a druhý záznam, obraz částice vstoupí a nebo vystoupí z vyhodnocované oblasti. Obraz počáteční polohy částice nemá ve vyhodnocované oblasti odpovídající protějšek do páru. Následuje nárůst korelačního šumu v důsledku náhodných korelací. Vyšší pravděpodobnost výskytu ztracených párů je na okrajích vyhodnocovaných oblastí. Pro eliminaci se využívá technika překrývání vyhodnocovaných oblastí, která zvyšuje pravděpodobnost nalezení počátečního i koncového obrazu částice.

## Velikost vyhodnocované oblasti

Volba velikosti vyhodnocované oblasti je kompromisem mezi prostorovým rozlišením a dynamickým rozsahem. Optimalizace prostorového rozlišení vede k minimalizaci plochy vyhodnocované oblasti. Dynamický rozsah naopak roste s větší plochou této oblasti, ovšem za předpokladu dodržení podmínky maximálního posuvu částice o jednu čtvrtinu strany oblasti:

$$|D_{\max}| = |v_{\max}| M \Delta t \leq \frac{d_I}{4} = \frac{N_{\text{int}} d_{\text{pixel}}}{4}, \quad (5)$$

kde:  $M$  ...transformace obrazové a objektové roviny  
 $d_I$  ...délka strany vyhodnocované oblasti [mm]  
 $N_{\text{int}}$  ... délka strany vyhodnocované oblasti [px]  
 $d_{\text{pixel}}$  ...vzdálenost mezi pixely [mm]  
 $v_{\max}$  ...vektor maximální rychlosti v objektové rovině [ $\text{m.s}^{-1}$ ]  
 $\Delta t$  ...časový interval mezi počátečním a koncovým záznamem [s]

Na volbě velikosti se však podílejí i další parametry, např. rozlišení záznamového média<sup>2</sup> a aplikace vhodného offsetu.

## Dynamický rozsah

Měřitelný dynamický rozsah metody je dán rozdílem maximální a minimální měřitelnou rychlostí. Maximální měřitelná rychlost vychází z podmínky maximálního posunutí částice o jednu čtvrtinu délky vyhodnocované oblasti. Pro maximální měřitelnou velikost rychlosti pak platí vztah:

$$|v_{\max}| = \frac{d_I}{4M\Delta t} \quad (6)$$

Minimální velikost měřitelného posunutí je určována efektivním průměrem obrazu částice. Musí být dodržena podmínka posunutí částice v časovém intervalu  $\Delta t$  alespoň o hodnotu průměru obrazu částice.

<sup>2</sup> V [1] autor uvádí doporučení pro CCD kameru s rozlišením 1024x1024 pixelů volbu rozměrů oblasti pro vzájemnou korelaci na hodnotu 32x32 pixelů a pro autokorelaci 64x64.

## **Hustota sycení částicemi**

Důležitý parametr pro kvalitu naměřených dat představuje hustota sycení proudu částicemi. Počet sytících částic zaznamenaných v každé vyhodnocované oblasti ovlivňuje odstup užitečného signálu od šumu. Na základě počítačové simulace Monte Carlo se dají stanovit tyto požadavky[5]:

- 5 částic přítomných ve vyhodnocované oblasti u vzájemné korelace
- 10 částic přítomných ve vyhodnocované oblasti u autokorelace

## **Velikost stopovacích částic**

Metoda PIV neměří ve skutečnosti rychlost proudu, ale rychlost částic unášených proudem tekutiny. Částice by proto měly dobře sledovat pohyb proudu a zároveň dobře rozptylovat laserové záření. Toto se dá ovlivnit vhodnou velikostí částic, která se pohybuje v závislosti na zkoumaném experimentu od jednotek milimetrů až po desítky mikrometrů.

### **1.2.4 Způsoby analýzy naměřených dat**

I přes dodržení výše uvedených doporučení dochází při výpočtu vektorových map z korelací k zobrazení chybných vektorů. Vektorovou mapu je tedy nutné dále různými metodami upravit. Funkce je ale nutné aplikovat velmi opatrně, neboť může dojít malou změnou parametrů k velkému ovlivnění výsledků. Několik následujících kapitol okrajově popisují finální úpravy surových vektorových map a zároveň nastiňují možné formy grafické prezentace výsledků. Detailnější pohled na tyto části bude uveden na ukázkovém příkladu rozboru naměřených dat (kapitola 3.1.1).

## **Peak validace**

Výška hlavního vrcholu v korelační rovině (Obr. 5) je hlavním parametrem pro určení validity vypočtené korelace. Pro autokorelaci a vzájemnou korelaci však představuje dva rozdílné pohledy. U autokorelace je kritériem poměr centrálního vrcholu k následujícímu nejvyššímu. U vzájemné korelace tato možnost neexistuje, tudíž důležitým činitelem je poměr dvou nejvyšších vrcholů korelační mapy.

## **Range validace**

Range validace je operace, která pracuje s již vypočtenými vektorovými mapami. Nastavením dolní či horní hranice rychlosti proudění se dají eliminovat chybné vektory (nereálně vysoké a nebo nepravděpodobně se vyskytující záporné rychlosti). Na výběr je nastavení jednotlivých složek rychlostí  $U$  a  $V$  a nebo celková velikost rychlosti.

## **Validace klouzavým průměrem**

Tato operace pracuje s vybraným vektorovým okolím bodu  $m \times n$ . Výsledkem je průměrný vektor rychlosti. I když existuje možnost místo odstraněných nevyhovujících vektorů dopočítat náhradní, v praxi se však doporučuje tyto vektory trvale eliminovat.

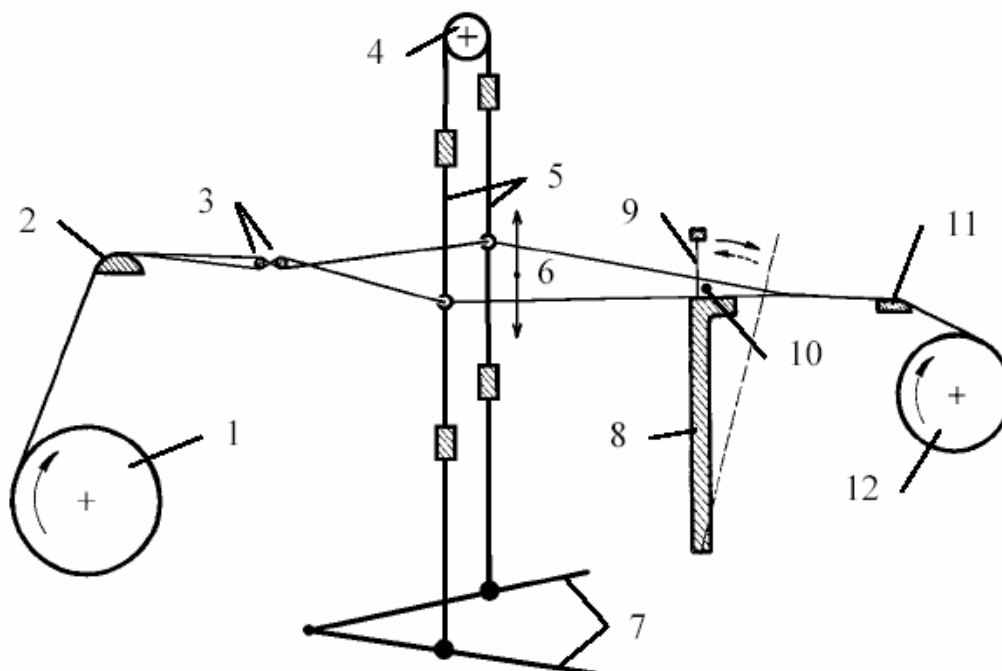
## **Filtrace klouzavým průměrem**

Po aplikaci výše uvedených operací následuje filtrace získané vektorové mapy. Filtrací se všechny vektory nahradí hodnotou odpovídající průměru ze zvolené velikosti okolí. Například příliš vysoké hodnoty rozměrů okolí mají za následek vyhlazení vektorové mapy a tudíž dochází ke ztrátě informací o dílčích rychlostních gradientech.

## 1.3 Vzduchový prohoz tkacích strojů

Následující text stručně popisuje poznatky o vzduchovém prohozu tkacích strojů. Pro pochopení dané problematiky je nejdříve nutné vysvětlit několik klíčových pojmů.

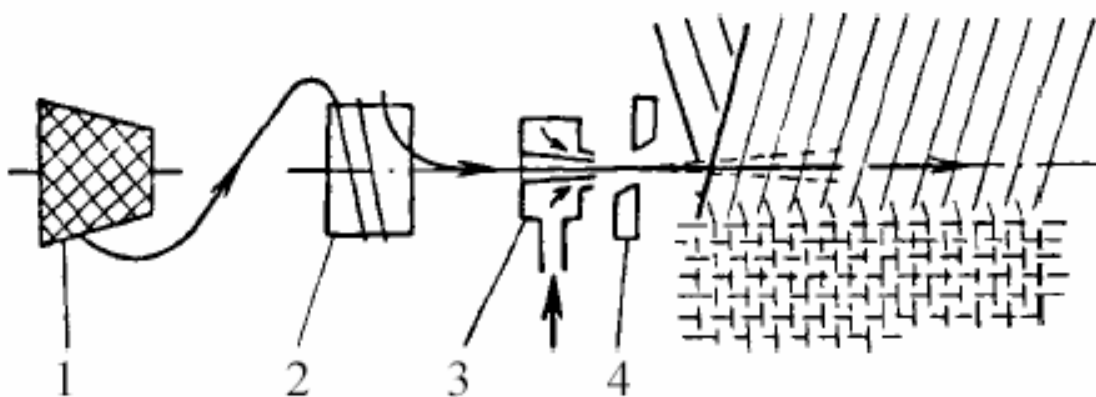
Tkanina je plošná textilie, tvořená zpravidla propojením dvou vzájemně kolmo probíhajících soustav nití, osnovy a útku. Soustava nití ležících ve směru délky tkaniny se nazývá osnova. Útek je nit kolmá k osnově a ukládá se rovnoběžně s předchozím útkem. Pro výrobu tkanin se používá tkacích strojů. Principiální schéma funkčních celků takového zařízení je znázorněno na obr. 7. Osnova se odvíjí z osnovního válu (1) přes osnovní svůrku (2) do tkací roviny. Křížové činky (3) zajišťují pořadí a rozdělení osnovních nití. Osnovní nitě jsou následně jednotlivě zavedeny do nitěnek. Následným rozdělením osnovních nití do dvou rovin se vytvoří klínový prostor nazývaný prošlup (6), do něhož je zanášen útek (10). Po prohození útku do prošlupu se pohybuje paprsek směrem ke tkanině a přirazí útek paprskem na bidle (9). V době přírazu útku se prošlup uzavírá a začíná se tvořit nový prošlup pro další útek. Vznikající tkanina je odváděna z tkací roviny přes prsník (11) a navíjí se na zbožíový vál (12).



Obr. 7 Uspořádání částí tkacího stroje

### 1.3.1 Tkací stroje s pneumatickým prohozem útku

Myšlenka prohazovat útek pomocí stlačeného vzduchu je poměrně stará a pochází již z roku 1911. K praktickému uplatnění však došlo až po druhé světové válce. Princip pneumatického tryskového prohozu je znázorněn na obr. 8. Z křížové cívky (1) se odvine a odměří délka útku potřebná pro jeden prohoz (2 - odměřovací zařízení). V okamžiku prohozu vychází z trysky (3) prohozní médium – vzduch a zanesení útku do prošlupu. Zanesený útek se sevře chapadlem a přirazí paprskem. Útek je následně odstřižen nůžkami (4).



Obr. 8 Princip tryskového prohozu

Z důvodu výroby tkaniny o větších šířkách je útek veden buď zvláštním lamelovým kanálkem – konfuzorem. Další možností je vedení útkové nitě v profilu paprsku za současného přívodu vzduchu speciálními tryskami do dráhy útku.

#### Výhody tryskových tkacích strojů:

- výkonnější
- energetická úspora
- bezpečnější
- méně hlučné
- vysoká dynamika procesu
- levnější provoz

## ◆ KAPITOLA 2

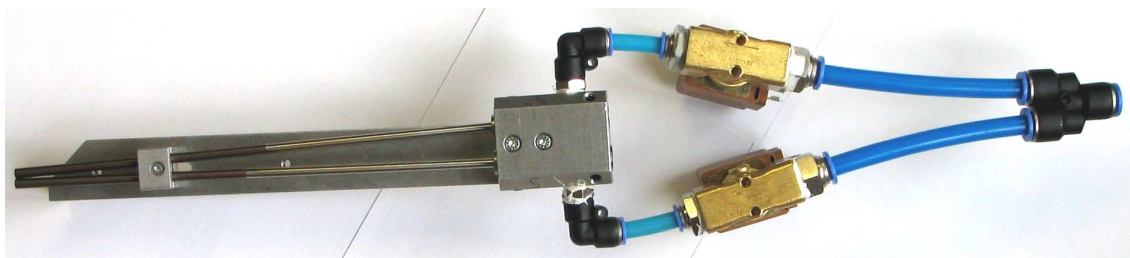
### 2.1 Popis experimentu

V minulosti v laboratoři Technické univerzity již probíhal experimentální výzkum tkacích trysek. Prvotní měření s využitím metody LDA ovšem neumožňovala studování chování proudu v jednotlivých fázích pracovního cyklu (rozběh proudu vzduchu, ustálení a doznívání). Měřily se tedy rychlostní profily pouze ve stacionárním stavu při nepřetržitém proudění vzduchu tryskou – tzv. kontinuální režim trysky. Ovšem skutečná pracovní činnost tkací trysky je poněkud odlišná. V reálném procesu tryska pracuje v tzv. pulzním režimu. Pomocí elektromagnetického ventilu (solenoidu) je proud vzduchu přerušován a sesynchronizován s tkacím procesem. Právě pro výzkum takového nestacionárního děje je metoda PIV vhodná. Při měření byly nastaveny následující pracovní podmínky reálného tkacího procesu:

- Vstupní přetlak vzduchu: 0,4 MPa
- Frekvence otevírání ventilu: 8 Hz (současné tkací stroje mají cca 500 ot/min)
- Doba otevření ventilu:  $\frac{1}{2}$  periody

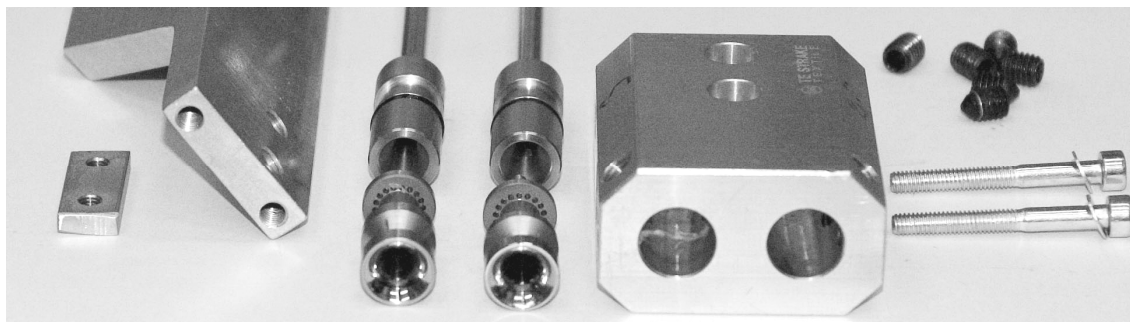
#### 2.1.1 Tkací tryska

Pro měření byla zvolena komerčně vyráběná hlavní tkací tryska od výrobce TE STRAKE Textile, typ 06, 2,5 a 3 mm. Sestava je tvořena dvěma dílčími tryskami, tělem obsahující šroubení a rychlospojkami pro přívod stlačeného vzduchu, dále obsahuje dva výměnné ejektory a upínací část. Ejektor je posuvný vůči plášti v rozsahu 0 až 3,5 mm. S rostoucím posuvem se zvětšuje průtočný průřez pro vstup vzduchu a tím roste spotřeba trysky a náchylnost ke zpětnému vyfukování části vzduchu (ze vstupního hrdla ejektoru).

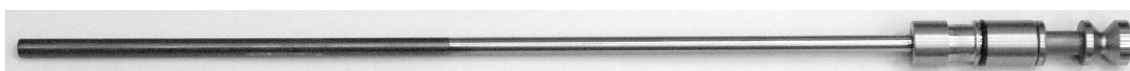


Obr. 9 Sestava trysky, nosné části, solenoidů a vzduchotechniky





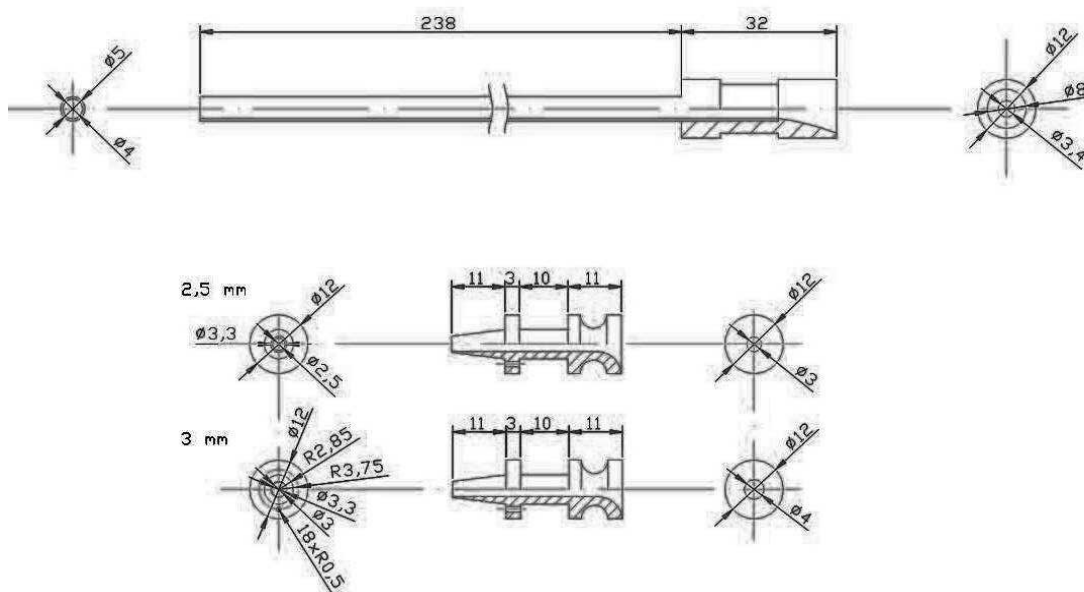
Obr. 10 Rozložená sestava trysky



Obr. 11 Tryska s ejektorem



Obr. 12 Ejektory trysek 2,5 a 3 mm



Obr. 13 Nastínění geometrie součástí tkací trysky

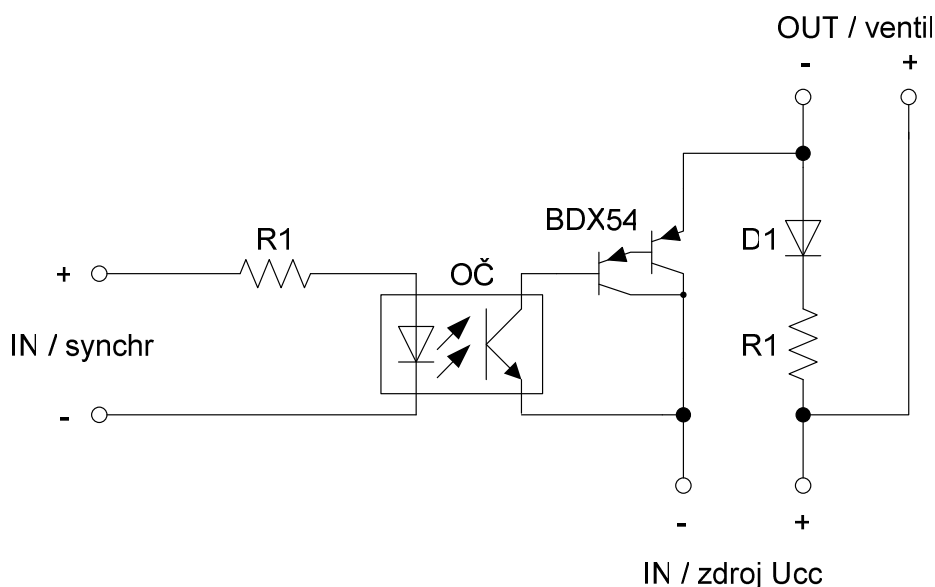
## 2.1.2 Elektromagnetický ventil, spínací obvod

Pro řízení přívodu vzduchu v pulzním režimu byly před tělo trysky umístěny elektromagnetické ventily dodané spolu s tryskou. Tento celek byl přiveden na laboratorní rozvod tlakového vzduchu. Provozní parametry solenoidů jsou:

- Napájecí napájení: 24 V
- Výkon: 7 W
- Experimentálně zjištěná maximální frekvence uzavírání ventilů: 14 Hz

Pro spínání solenoidu v konkrétním bodě pracovního cyklu byl použit laboratorní funkční generátor Agilent 33220A. Výstupní signál generátoru ale není schopen ovládat solenoid s odběrem 7W, z tohoto důvodu byl do obvodu zapojen elektronický ovládací obvod. Elektrické zapojení obvodu je znázorněno na Obr. 14.

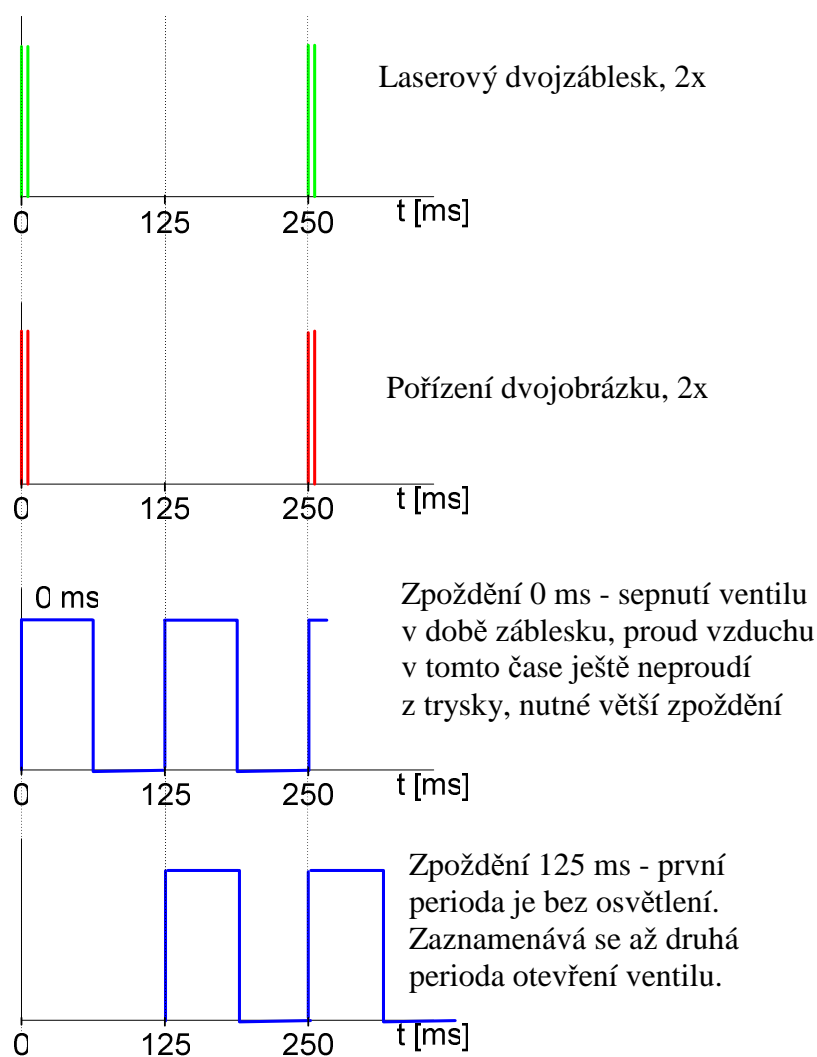
Pro zachování shodných podmínek měření u obou trysek byl nakonec používán tentýž solenoid. Toto umožnilo vzájemné porovnání jednotlivých trysek, aniž by se projevil odchylky dané výrobními nepřesnostmi obou ventilů.



Obr. 14 Elektrický obvod pro spínání solenoidu

### 2.1.3 Synchronizace solenoidu s měřicím zařízením

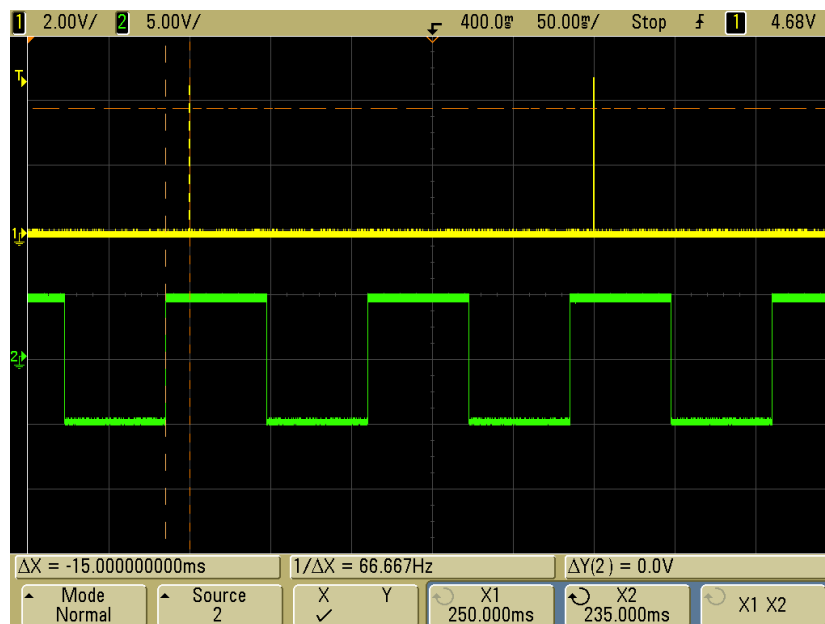
Pro proměření celé periody v pulzním režimu trysky bylo nutné ovládat okamžik spínání solenoidu a čas záblesku laseru spolu se snímáním obrazu kamerou. Tohoto bylo docíleno využitím programovatelných výstupů na jednotce HUB PIV systému. Řídící jednotka vysílá signál s informací o okamžiku záblesku laseru. Na základě tohoto signálu je sepnut solenoidový ventil. Programovým nastavením lze vysílané signály zpožďovat a tím určovat část periody, která má být zaznamenána. Následující schéma popisuje časové rozestupy při synchronizaci.



Obr. 15 Rozbor časové synchronizace experimentu<sup>3</sup>

<sup>3</sup> Pro proměření celé periody je vhodné nastavit zpoždění na 125 ms. Tento čas charakterizuje počátek periody. Pro posuv v pracovní periodě se snižuje hodnota zpoždění až k nule, což představuje opět počátek nové periody.

Obr. 16 pořízený z osciloskopu zobrazuje ovládací signál (žluté barvy) z HUB jednotky a obdélníkový průběh (zelený signál) ovládající svojí horní úrovní otevření solenoidu. Zpoždění je nastaveno v tomto případě na hodnotu 110 ms. Tímto bylo docíleno pořízení záznamu 15 ms po otevření ventilu.



Obr. 16 Synchronizace ventilu se zpožděním 110 ms

Nastavení parametrů funkčního generátoru:

- Režim: external triggered, burst mode
- Frekvence obdélníkového signálu<sup>4</sup>: 8,0001 Hz
- Amplituda: 2,5 V<sub>RMS</sub>
- Počet modulovaných period pro budící signál: 2

<sup>4</sup> Při modulaci 8Hz signálu provede generátor po příchodu externího pulzu celou sekvenci modulace, do této doby ale nereaguje na následující triggerovací signál. Změnou frekvence na hodnotu 8,0001 Hz je zaručeno ukončení celé sekvence ještě před příchodem následujícího triggerovacího signálu z HUBu.

## **2.1.4 PIV měřicí systém**

Pro experimentální výzkum proudového pole za tkací tryskou bylo použito klasické uspořádání 2D PIV systému. Laserový zdroj světla osvětloval proud vzduchu obohacený o stopovací částice u ústí trysky v horizontální poloze. Digitální kamera snímala tento obraz shora. Popis jednotlivých částí měřicího systému je v následujících kapitolách.

### **Laser**

Světelný řez v zajišťoval pulzní laser NewWave Gemini. Pevnolátkový Nd: YAGový laser produkuje neviditelné infračervené záření o vlnové délce 1064 nm. Zároveň generuje druhou harmonickou o vlnové délce 532 nm. Toto světlo je již ve viditelném spektru<sup>5</sup>, má zelenou barvu a je vhodné pro potřeby experimentu. Z laseru se dá uvolnit během jednoho 10ns pulsu energie o hodnotě 120 mJ. Vyzářená energie během takto krátké doby odpovídá výkonu 12 MW.

Z principu PIV metody měření je nutné generovat dva osvětlující paprsky během krátkého intervalu se shodnou intenzitou. Z tohoto důvodu obsahuje laser dvě nezávislé jednotky, každá s vlastním zdrojem, výbojkou, krystalem a ovládacím panelem.

### **Snímací technika**

Pro zaznamenávání obrazu osvětlených částí byla používána speciální digitální CCD kamera HiSense 12bit. Kamera zaznamenává obraz černobíle s 12 bitovou jasovou diferencí při maximálním možném rozlišení. Výrobce zaručuje u tohoto typu kamery v režimu dvojnásobné expozice pořízení druhého z dvojsnímku s minimální prodlevou 0,4  $\mu$ s. Kamera byla doplněna fotoobjektivem AF Micro-Nikkor s ohniskovou vzdáleností 60 mm. Dále byl na objektivu kamery použit optický filtr propouštějící světlo pouze s vlnovou délkou 532 nm<sup>6</sup>. Kamera byla umístěna zhruba 50 cm nad proudem vzduchu z trysky, toto umožňovalo pořizovat fotografie zabírající plochu 50x40 mm.

---

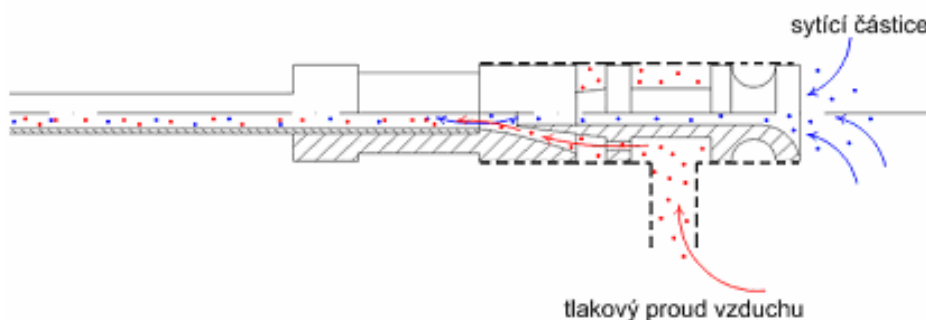
<sup>5</sup> Lidským okem viditelné záření se nachází v intervalu vlnových délek 400 až 700 nm. Hodnoty pod 400 nm se nazývají ultrafialové (UF), hodnoty nad 700 nm jsou infračervené (IR).

<sup>6</sup> Použitím optického filtru je potlačeno ovlivnění naměřených výsledků okolním nežádoucím světlem. Optický filtr propustí pouze světlo generované používaným laserem.

## Sycení stopovacími částicemi

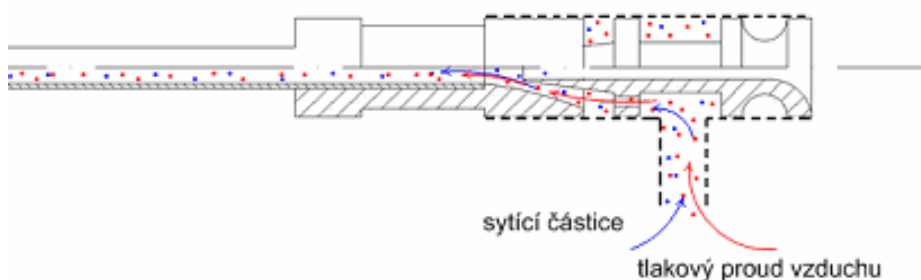
Pro generování částic byl používán kapalinový generátor SCITEK LS-10 [5]. Tento sytící systém je vhodný při měření s PIV i LDA. Využívá se také pro tvorbu olejové mlhy při znázornění obtékání předmětů a například i pro studie tvaru plamene při spalovacích procesech.

Sycení částicemi v této aplikaci bylo možné provést dvěma způsoby. V prvném případě by se mohlo využít ejektorového jevu. Proud vzduchu s rozptýlenými částicemi by se přivedl před vstupní část ejektoru a částice by se tímto v místě ústí ejektoru smísily s hlavním tlakovým proudem vzduchu (obr. 17). Tento způsob se však ukázal jako nevhodný pro svojí nedostatečnou sytící schopnost.



Obr. 17 Sycení částicemi pomocí ejektoru

Vhodnějším krokem se tedy ukázal následující postup. Proud vzduchu vycházející z generátoru a obsahující stopovací částice se pomocí vzduchotechnických propojek přímo směšoval s hlavním tlakovým proudem vzduchu (obr. 18). Přetlak do generátoru částic byl vždy nastaven o 0,3 MPa více než přetlak v hlavní větvi rozvodu vzduchu. Tento systém zajišťoval jak snadnou regulaci koncentrace částic v proudu vzduchu tak i lehké nastavení změny tlaku v obou větvích.



Obr. 18 Sycení částicemi sloučením proudů před tryskou

## **Obslužný program**

Pro zpracování získaných záznamů bylo využíváno softwarové prostředí FlowManager. V programu je implementované nejen ovládací rozhraní prvků systému PIV (synchronizace kamera-laser, časové parametry snímání obrazů, spouštění laseru...), ale tento software umožňuje také kompletní správu a zpracování naměřených dat a následné zobrazení dosažených výsledků. Při vyhodnocování získaných obrazů je možné aplikovat několik propracovaných algoritmů s četným nastavením vlastností. Podrobnější popis bude ukázán později při zpracování dat.

## ◆ Kapitola 3

### 3.1 Měření

Experiment probíhal dle podmínek popsaných v kapitole 2.1. Pracovní tlak přívodu vzduchu byl nastaven v průběhu experimentu na konstantní hodnotu 0,4 MPa. Pro pozdější ověření platnosti naměřených dat a možnost diskuze ohledně nadzvukových rychlostí byly obě trysky proměřeny navíc při přetlaku 0,3 a 0,5 MPa. V závěru experimentu byla zvolena i hodnota 0,2 MPa.

Vzdálenost počátku obrazu od konce trysky byla 2 mm. Velikost zkoumané oblasti byla zvolena 50 x 40 mm. Toto odpovídá více než dvanáctinásobku průměru trysky. Velikost oblasti plně vystihne počáteční rozvoj proudu, jeho ustálený stav a také dozívání. Z použité techniky a uvedených postupů vyplývá několik následujících faktorů:

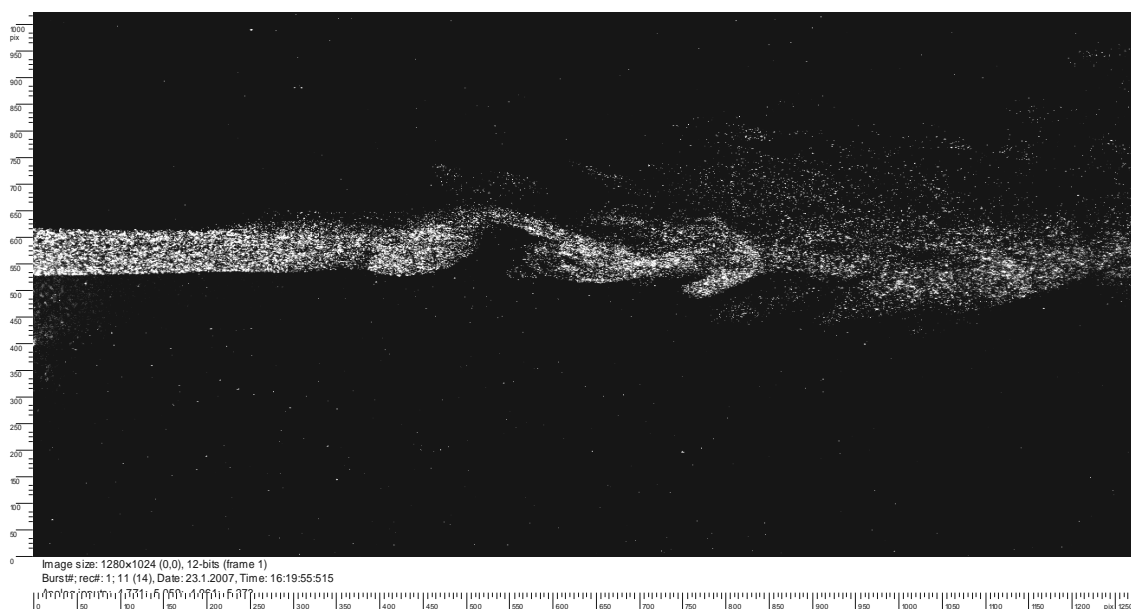
- Velikost snímaného obrazu: 50 x 40 mm
- Rozlišení kamery: 1280 x 1024 pixelů
- Měřítko transformace obrazu: 5,85
- Velikost vyhodnocované oblasti: 64 x 64 případně 64 x 32 pixelů
- Překrytí obrazů: 50 %

U snímání obrazů je nutné dodržet maximální posuv částic na prvním a druhém snímku o  $\frac{1}{4}$  vyhodnocované oblasti. Tato prodleva záleží na zvolené velikosti vyhodnocované oblasti a na předpokládané velikosti rychlosti proudu. Při měření v pulzním režimu trysky byla časová prodleva mezi expozicemi prvního a druhého záznamu operativně měněna v závislosti na rozvoji rychlosti proudu v rozmezí 1,5 až 100  $\mu$ s.



### 3.1.1 Zpracování naměřených dat z PIV

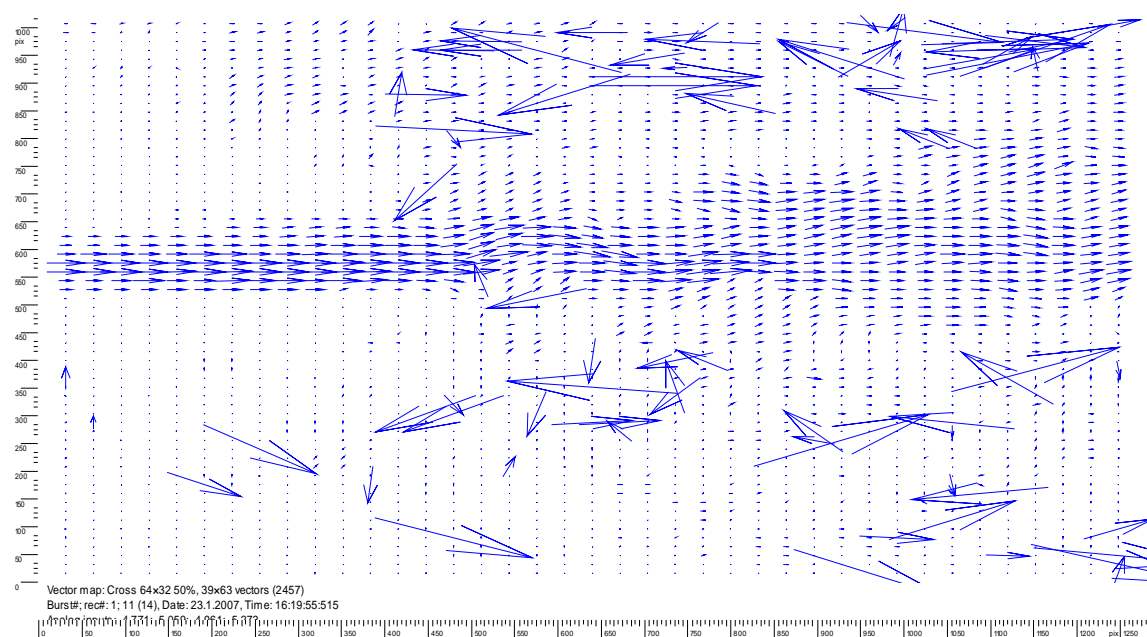
Zpracovávání naměřených dat bude vysvětleno na jednom z pořízených záznamů. Obr. 19 zaznamenává proud vzduchu v pulzním režimu při doznívání rychlosti pohybu. Záznam byl vybrán z důvodu výskytu oblastí s vysokými i nízkými rychlostmi proudění, zároveň obsahuje i oblasti s minimálním výskytem sytících částic, kde je předpoklad vzniku chybných vektorů. V levé části je vidět souvislý doznívající proud vzduchu pohybující se zleva doprava. Vzhledem k malé rychlosti pohybu se již po několika málo centimetrech proud vzduchu rozpadá a vznikají drobné víry. V krajní pravé části záznamu je proud již téměř plně rozpadlý a rychlost částic je minimální, blíží se k nule.



Obr. 19 Zpracování dat PIV – záznam obrazu

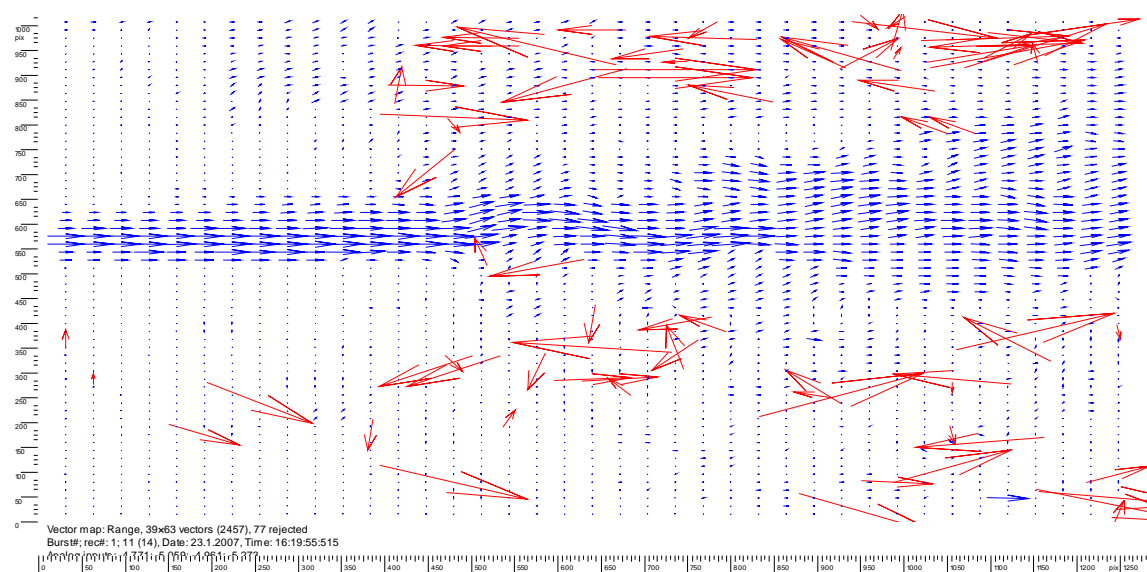
Zobrazený záznam už také předem nastiňuje předpokládanou podobu vektorové mapy. Oblasti s vysokou hustotou částic budou prezentovány vektory stejného směru jako pohybující se proud.

Po aplikaci vzájemné korelace na pořízený záznam je vypočtena vektorová mapa, znázorněná na Obr. 20. Na mapě lze snadno rozeznat hlavní proud v levé části a jeho postupný rozpad ve víry v pravé části. Takto získaná vektorová mapa je většinou zatížena chybnými vektory (např. v oblastech s velmi malým obsahem částic). K jejich odstranění jsou k dispozici validační metody.



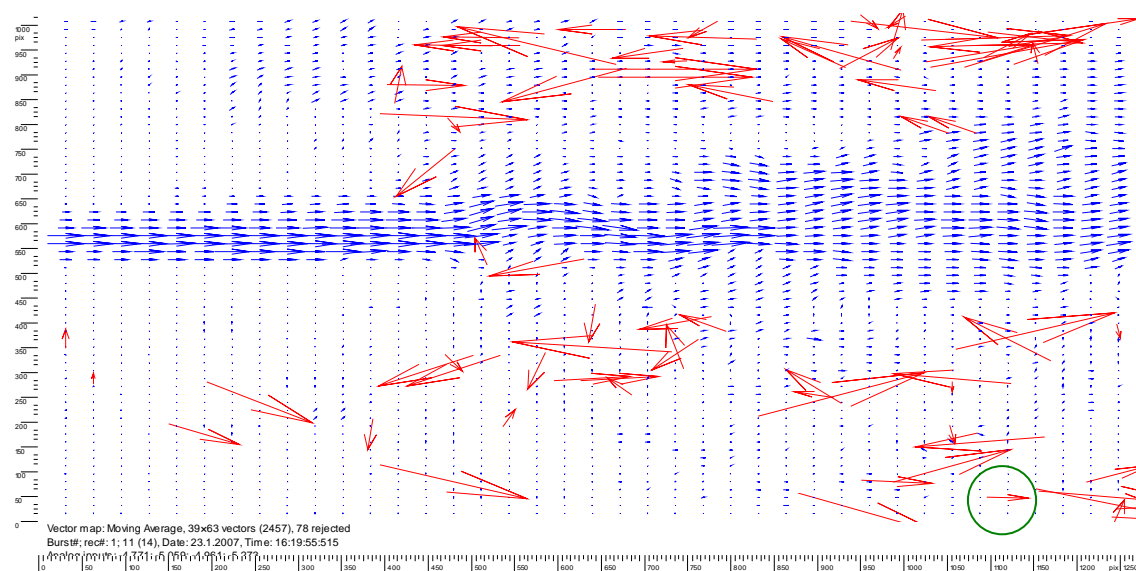
Obr. 20 Zpracování dat PIV – vektorová mapa vzájemné korelace

Pro odstranění většiny chybných vektorů je vhodné použít validaci rozsahu (Range Validation). Ze surové vektorové mapy je nutné zjistit maximální rychlosti v proudovém poli a dále je také nutné zamyslet se, zda-li v obraze vznikají větší víry a tím pádem vyskytující se záporné rychlosti. V tomto případě byly z korelační mapy určeny následující údaje: nízká rychlost proudu - do 3 m/s, malá změna směru pohybu proudu ve svislé ose a proti směru hlavního proudu - do 1 m/s. Aplikací metody se získá nová vektorová mapa zobrazená na Obr. 21.



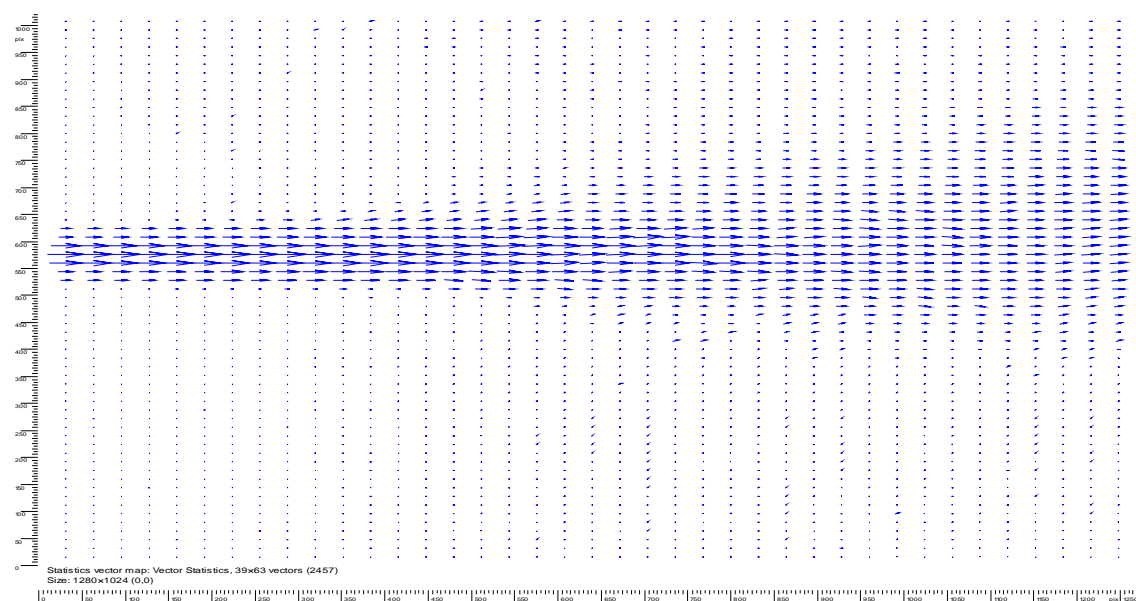
Obr. 21 Zpracování dat PIV – Range validace

Další metoda je validace klouzavým průměrem (Moving Average Validation). Tato metoda porovnává odchylky jednotlivých vektorů vzhledem ke svému okolí. Dle velikosti akceptačního faktoru je rozhodnuto, zda je zkoumaný vektor platný nebo bude odstraněn. Vypočtená vektorová mapa je zobrazena na Obr. 22



Obr. 22 Zpracování dat PIV – validace klouzavým průměrem

V každém bodě měření bylo pořízeno 50 záznamů. Po aplikaci výše prezentovaných metod byly mapy zprůměrovány. Výsledkem je vektorová statistika (Obr. 23), která eliminuje drobné odchylky proudu v jednotlivých záznamech a zobrazuje hlavní tendenci vývoje proudění.

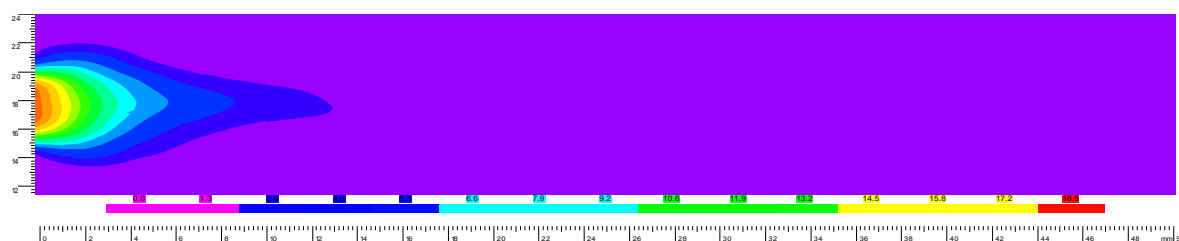


Obr. 23 Zpracování dat PIV – vektorová statistika

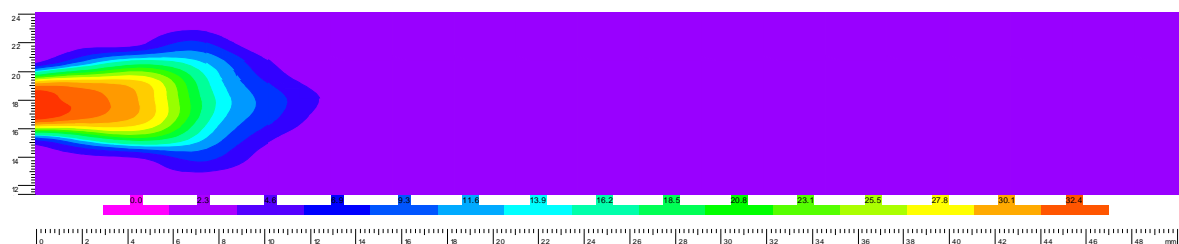
## 3.2 Výsledky měření

Následující podkapitoly popisují naměřené vlastnosti proudu vzduchu v pulzním a kontinuálním režimu. Dále jsou předvedeny výsledky doplňujících měření.

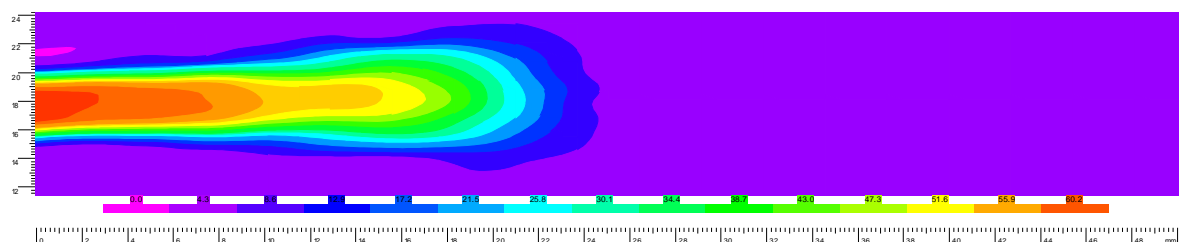
### 3.2.1 Pulzní režim trysky (tryska 2,5 mm, přetlak 0,4 MPa)



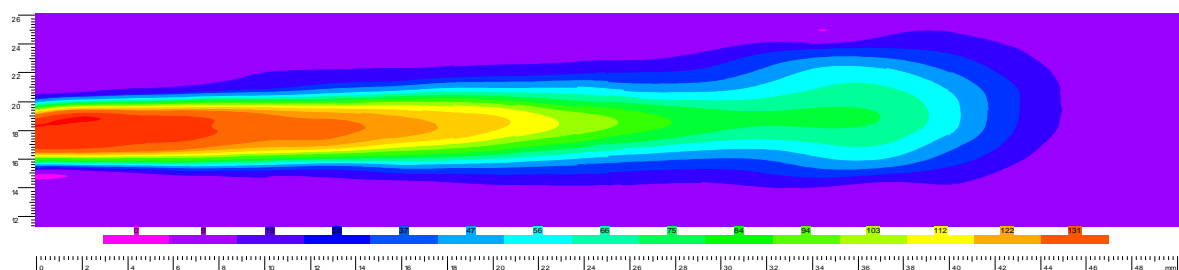
Obr. 24 Pulzní režim, skalární mapa,  $t=15,0$  ms,  $v_{\max}=18,5$  m/s



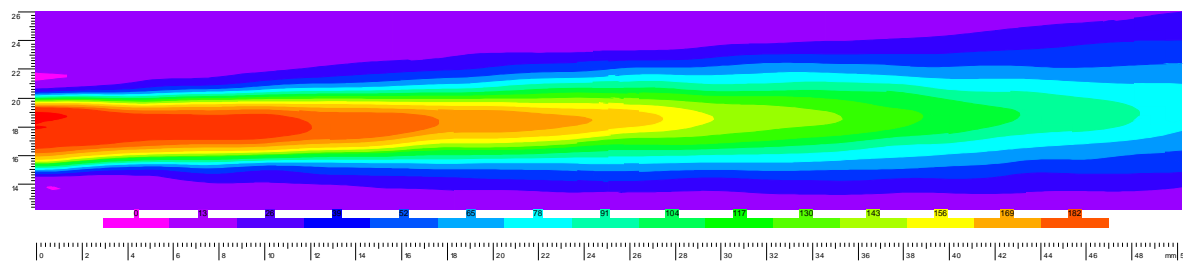
Obr. 25 Pulzní režim, skalární mapa,  $t=15,4$  ms,  $v_{\max}=32,4$  m/s



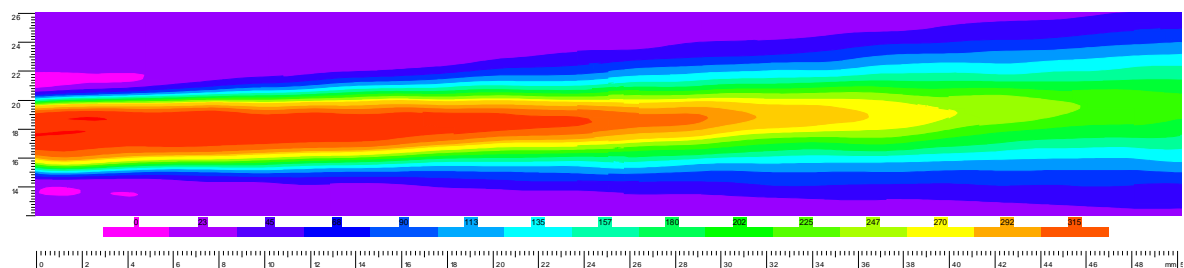
Obr. 26 Pulzní režim, skalární mapa,  $t=16,2$  ms,  $v_{\max}=60,2$  m/s



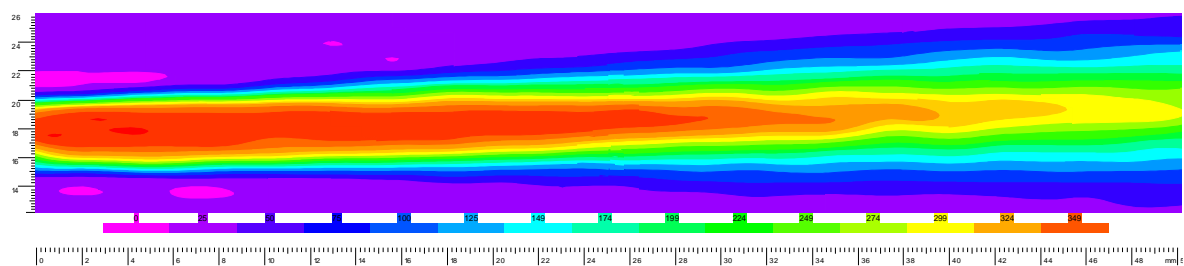
Obr. 27 Pulzní režim, skalární mapa,  $t=16,8$  ms,  $v_{\max}=131$  m/s



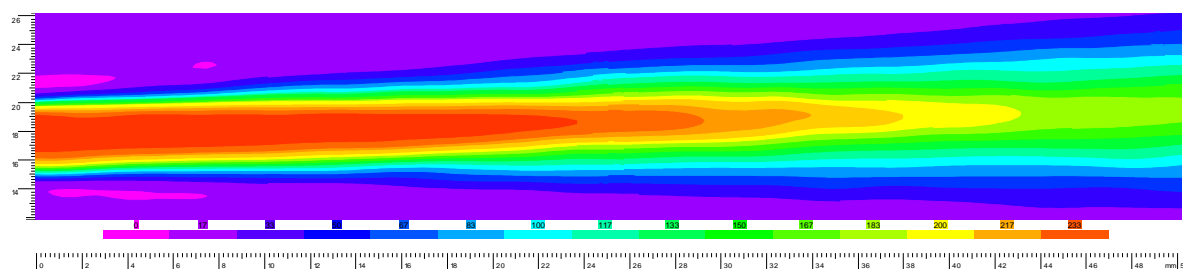
Obr. 28 Pulzní režim, skalární mapa,  $t=17,4$  ms,  $v_{\max}=182$  m/s



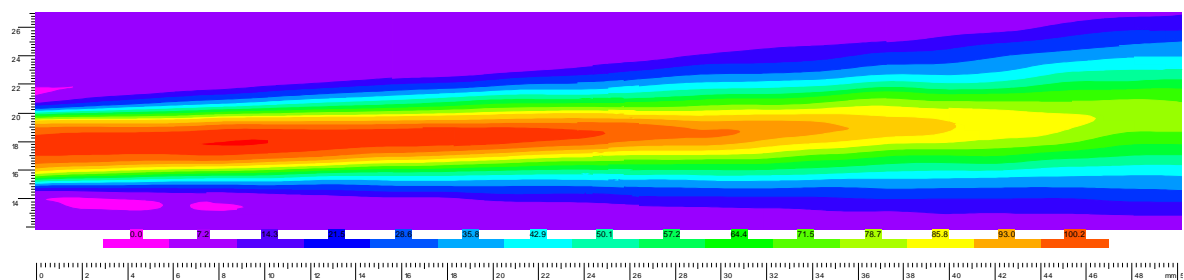
Obr. 29 Pulzní režim, skalární mapa,  $t=18,2$  ms,  $v_{\max}=315$  m/s



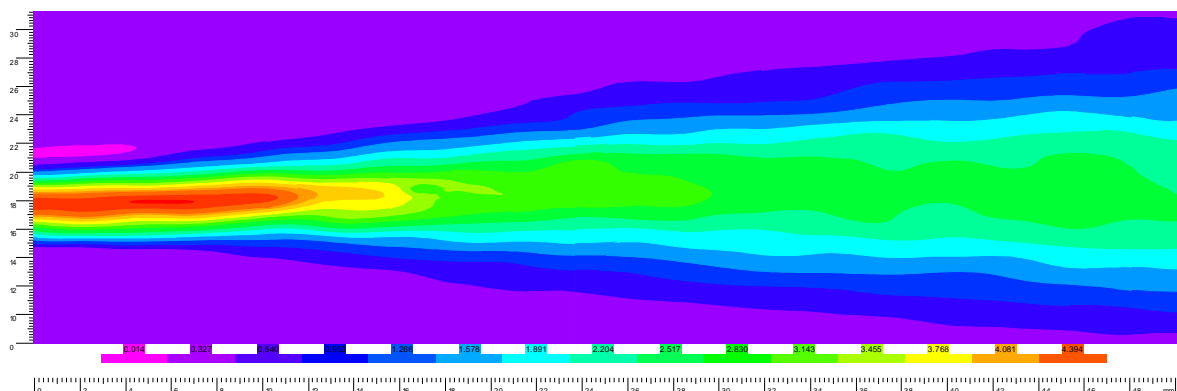
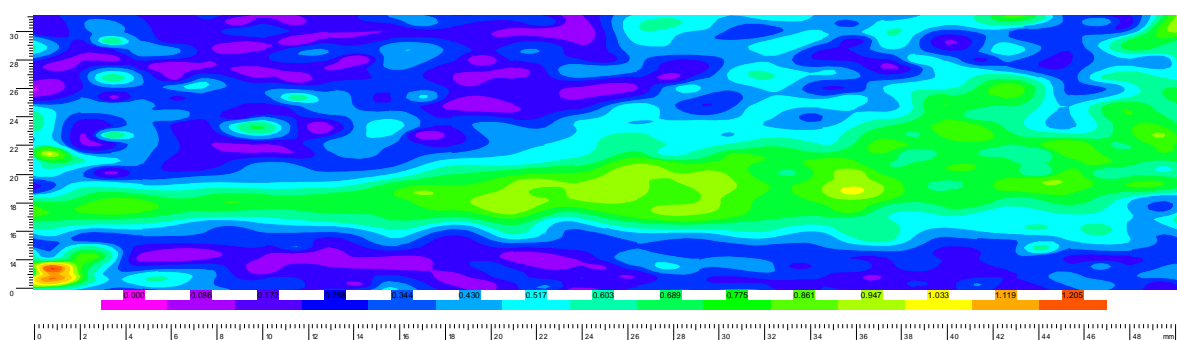
Obr. 30 Pulzní režim, skalární mapa,  $t=42,0$  ms,  $v_{\max}=349$  m/s



Obr. 31 Pulzní režim, skalární mapa,  $t=82,0$  ms,  $v_{\max}=233$  m/s



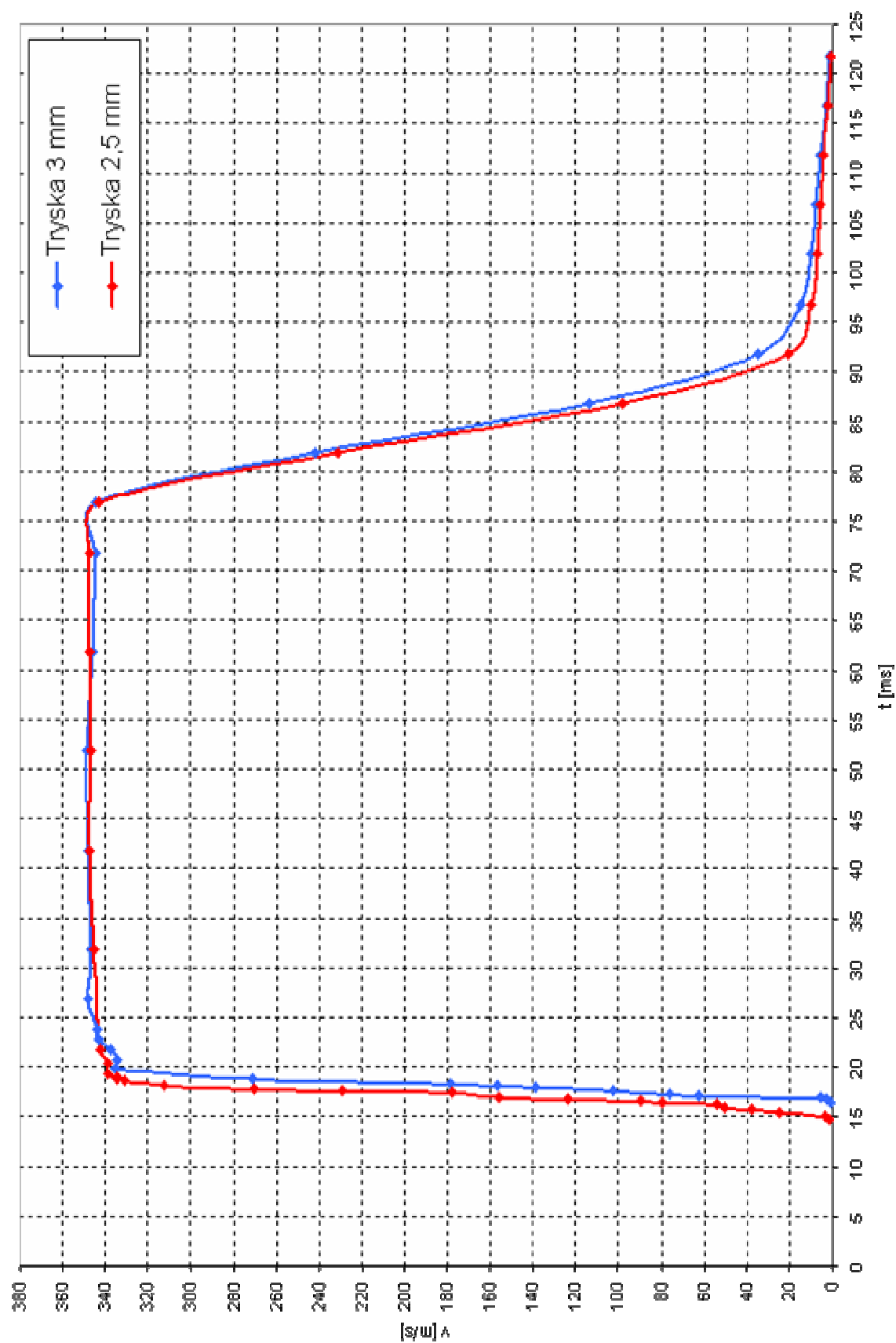
Obr. 32 Pulzní režim, skalární mapa,  $t=87,0$  ms,  $v_{\max}=100$  m/s

Obr. 33 Pulzní režim, skalární mapa,  $t=117$  ms,  $v_{\max}=4,4$  m/sObr. 34 Pulzní režim, skalární mapa,  $t=125$  ms,  $v_{\max}=1,2$  m/s

Vybrané skalární mapy (Obr. 24 až Obr. 35) popisují vývoj proudu v pulzním režimu. Parametr  $t$  představuje prodlevu mezi signálem spínající elektromagnetický ventil a okamžikem měření. Z provedených měření lze vyjádřit závislost rychlosti proudu vzduchu na čase  $t$ . Výsledný graf je zobrazen na Obr. 35. Z grafu je patrné, že proud vzduchu za tryskou se začíná vyvíjet 15 ms po sepnutí elektromagnetického ventilu. Tuto prodlevu lze vysvětlit zpožděním otevření ventilu a dobou průchodu vzduchu ventilem. Po následujících 5 ms dosahuje proud vzduchu již své 98% maximální rychlosti 346 m/s. Zrychlení v tomto intervalu představuje hodnotu  $68\,000\text{ m/s}^2$ . Popsaný úsek se nazývá rozběh proudu.

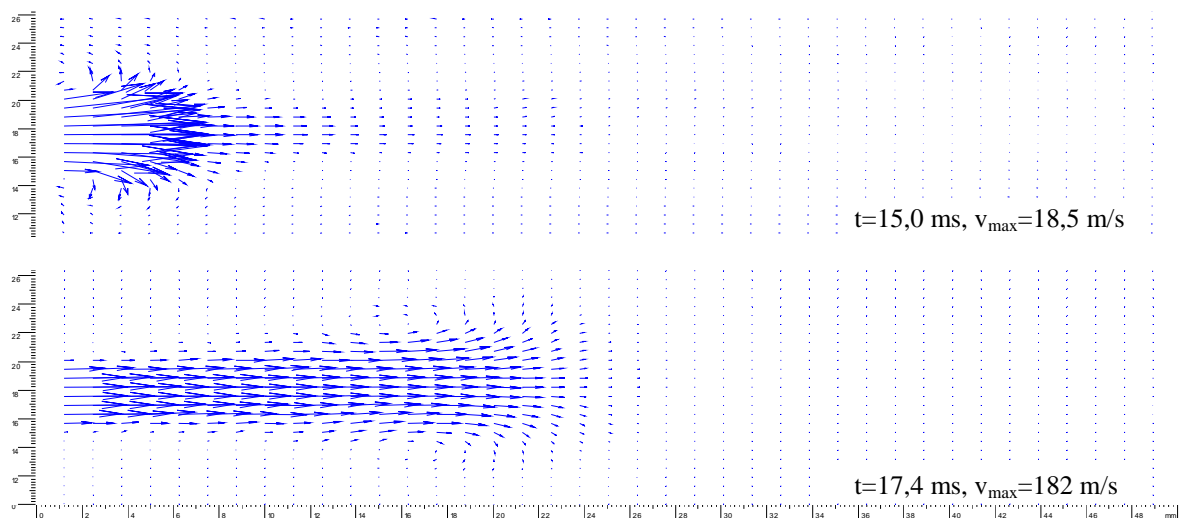
V intervalu od  $t=20$  ms do  $t=78$  ms má proud téměř stacionární vlastnosti a rychlost pozvolna roste z 340 m/s k hodnotě 346 m/s. Tento úsek je nazýván ustálení proudu.

V čase  $t=62,5$  ms je vyslán signál pro uzavření ventilu. Rychlost v tomto okamžiku je rychlost proudu stále 346 m/s. Pokles rychlosti nastává až v čase  $t=78$  ms, tedy 15,5 ms po signálu zavírací ventil. Rychlost na konci periody ( $t=125$  ms) je 1,2 m/s a tato hodnota setrvává až do okamžiku urychlení následujícím proudovým pulzem. Popsaný úsek je označován jako doznívání proudu.

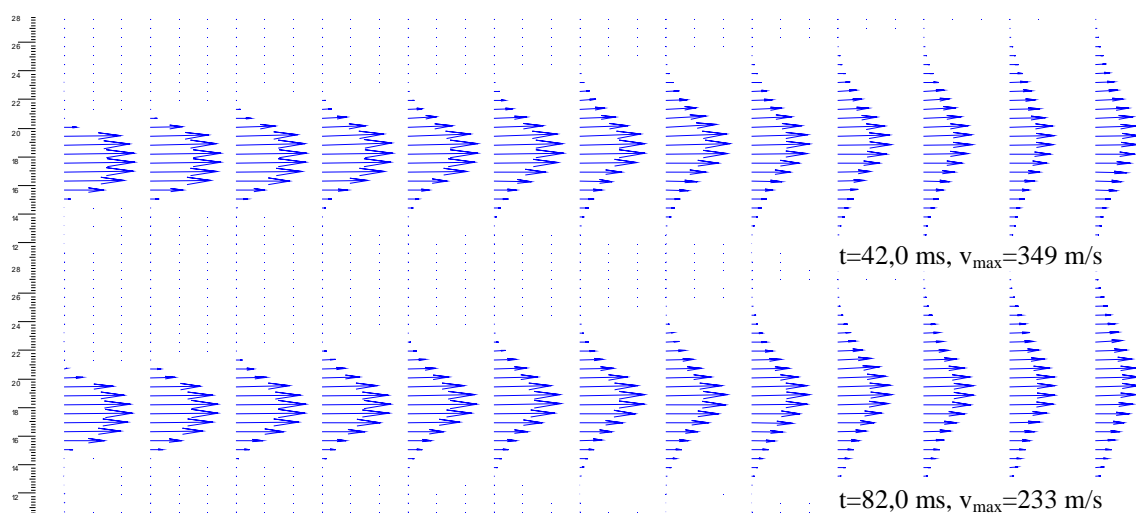


Obr. 35 Pulzní režim – vývoj rychlosti proudu v čase (4mm od ústí trysky)

Následující série obrazů charakterizuje vývoj proudu v jedné pracovní periodě pomocí vektorových map.



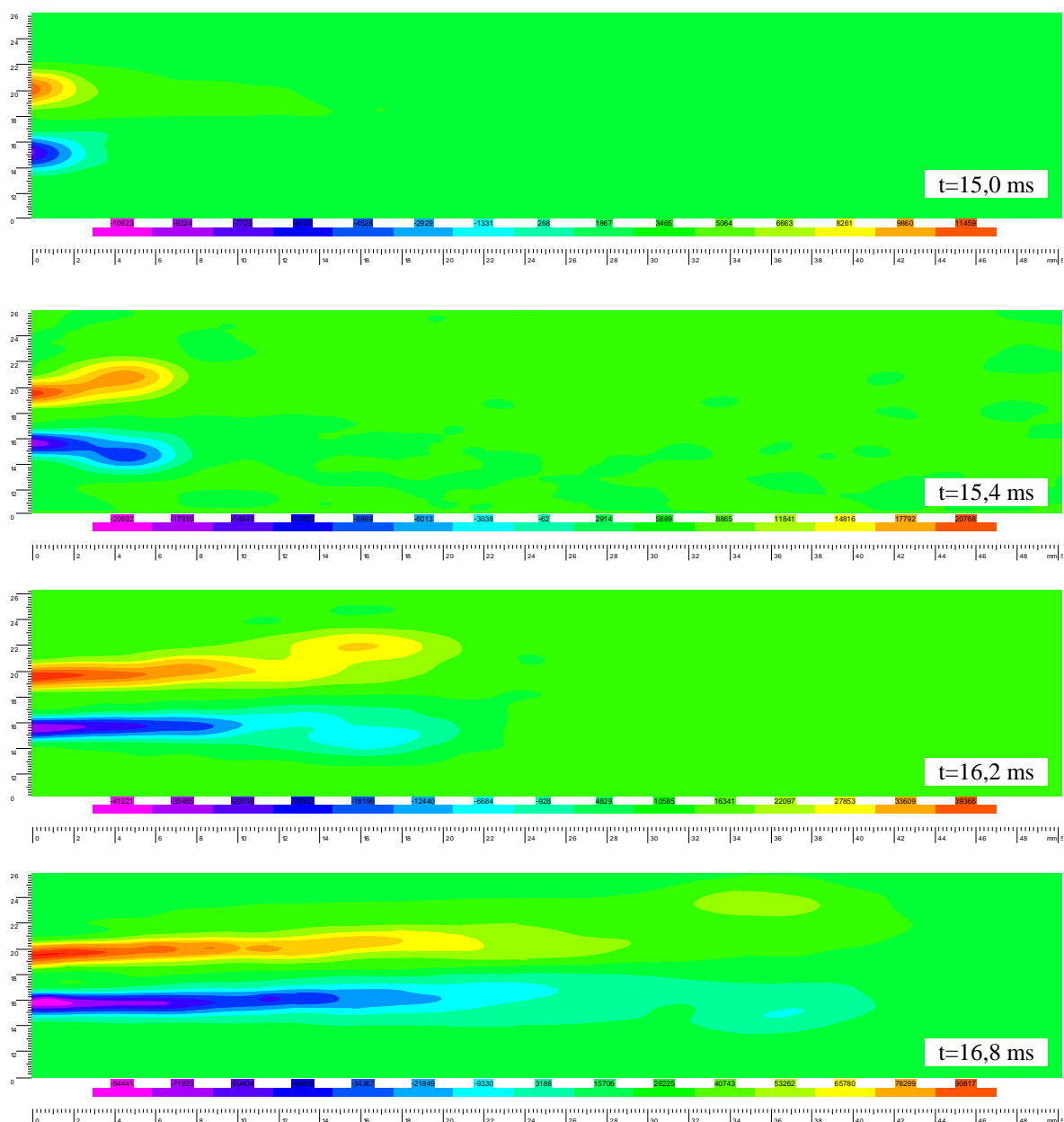
Obr. 36 Pulzní režim – vývoj proudu (vektorové mapy)



Obr. 37 Pulzní režim – ustálení a doznívání proudu (vektorové mapy)

Na Obr. 36 v čase  $t=15,0 \text{ ms}$  je patrný vznik dvojice vírů na okrajích proudu. Víry jsou osově symetrické, jejich směr rotace je opačný a postupují na čele proudu. Vývoj vírů bude lépe znázorněn na následujících vířivostních mapách. U Obr. 37 je již pozorovatelné vytváření rychlostního profilu proudu. V levé části obrazu je znatelné zploštění čela rychlostního profilu, což představuje vyrovnané rychlosti proudu. S přibývajícím vzdáleností se proud rozšiřuje, klesá jeho rychlost podél okrajů proudu a celý proudový profil se stává zaoblenější.





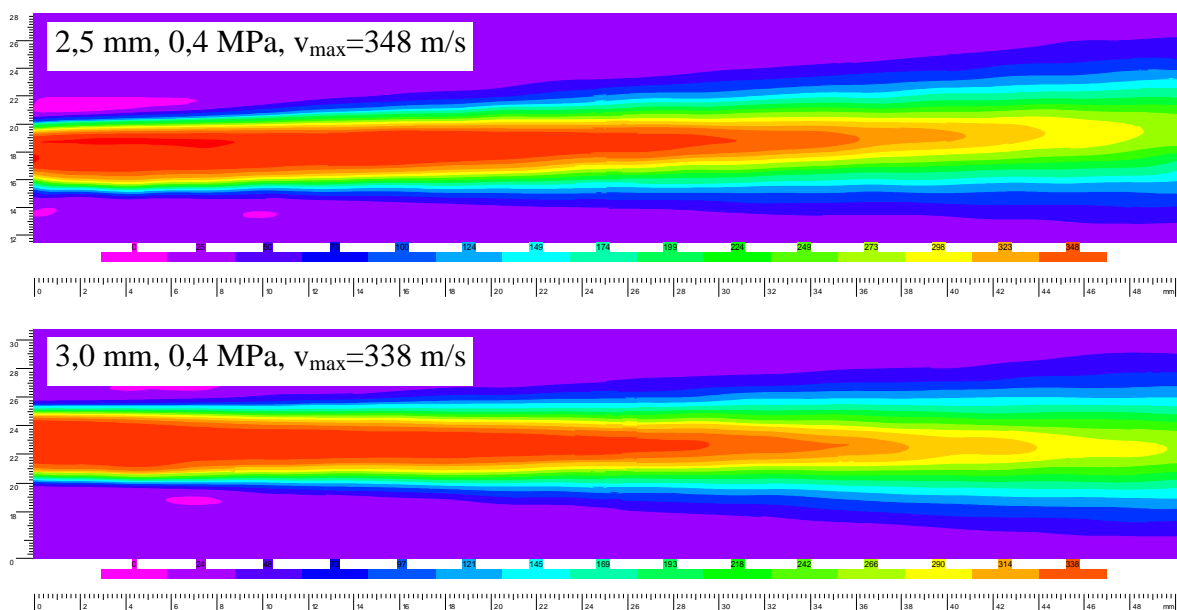
Obr. 38 Pulzní režim - vývoj proudu (mapy vířivosti)

Obr. 38 zachycuje vznik a vývoj páru vírů. Víry jsou symetrické podél pomyslné osy trysky a jsou charakterizovány opačným směrem rotace. V čase  $t=16,2$  ms se oba víry začínají oddělovat a postupně zanikají. Uvnitř vírů již vířivost nedosahuje maximálních hodnot. Maximálních hodnot vířivosti je dosahováno na hranici proudu a okolního prostředí vlivem velkého vzájemného rychlostního gradientu.

Výsledky 3mm trysky jsou v porovnání s 2,5mm velmi podobné. Rozdíl je ve 2ms zpoždění rozvoje proudu po otevření ventilu (Obr. 35). Kompletní výsledky pro porovnání trysek jsou na příloženém CD.

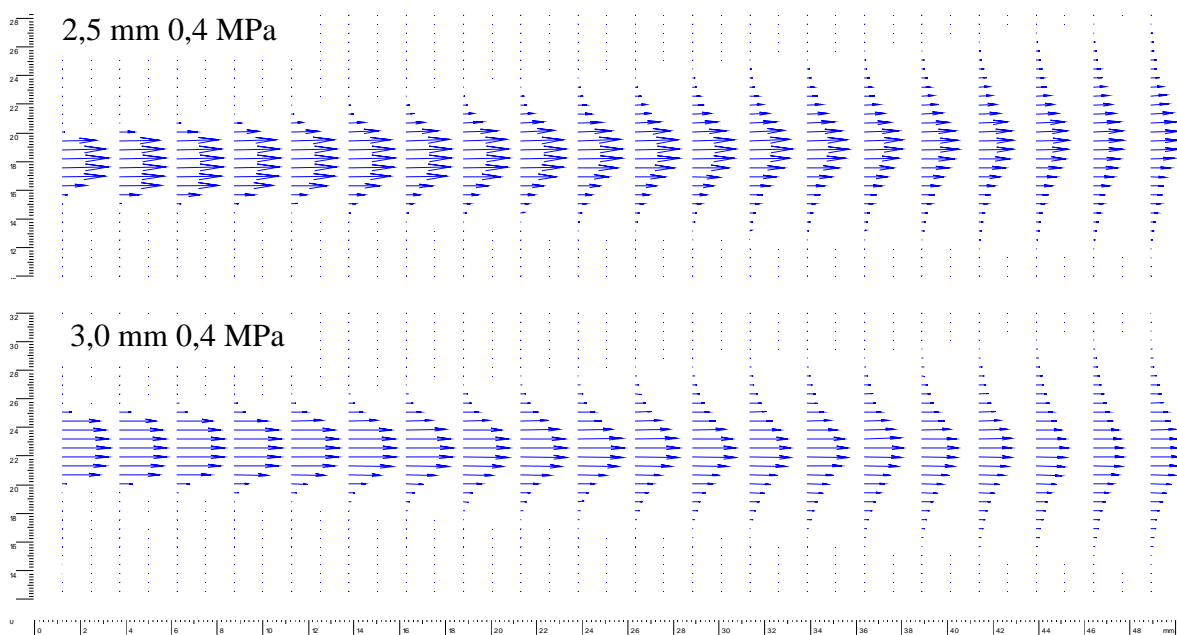
### 3.2.2 Kontinuální režim trysky

Na následujících obrázcích jsou znázorněny grafické výsledky měření obou tkacích trysek v kontinuálním režimu. Obr. 39 znázorňuje skalární mapy rychlostí vzduchu. Nejvyšší rychlosti se vyskytují těsně za ústím trysek. S přibývajícím vzdáleností rychlost pozvolna klesá. Maximální rychlost v Xové ose je u 2,5mm trysky 348 m/s, pro 3mm trysky je maximální hodnota rychlosti rovna 338 m/s.

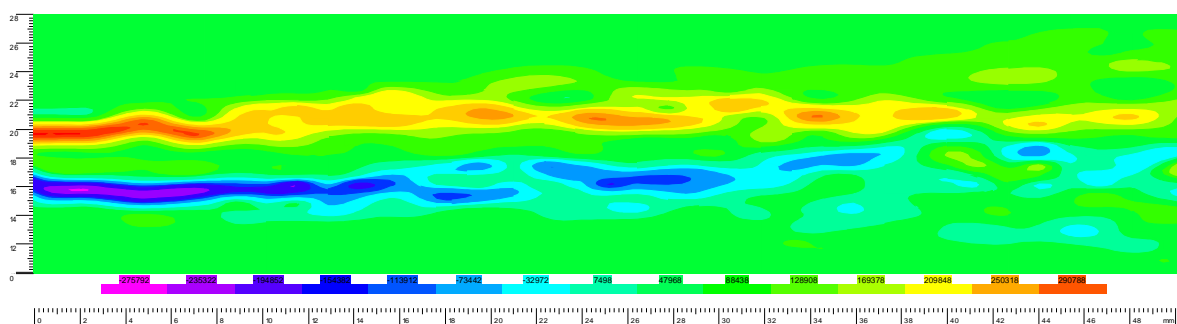


Obr. 39 Kontinuální režim - skalární mapy rychlostí proudu

Rychlostní profily jsou zobrazeny na Obr. 40. Téměř plochý tvar v celé šířce rychlostních profilů v blízkosti ústí trysky odpovídá vyrovnané rychlosti proudění vzduchu. S přibývajícím vzdáleností hlavní proud vzduchu rozpadá, rozšiřuje se, klesá jeho rychlost a rychlostní profil se více zaobluje. V dílčích záznamech se při okrajích proudu vyskytují nepravidelné různě velké víry, zprůměrováním padesáti záznamů zanikají. Víry jsou zaznamenány na Obr. 41.



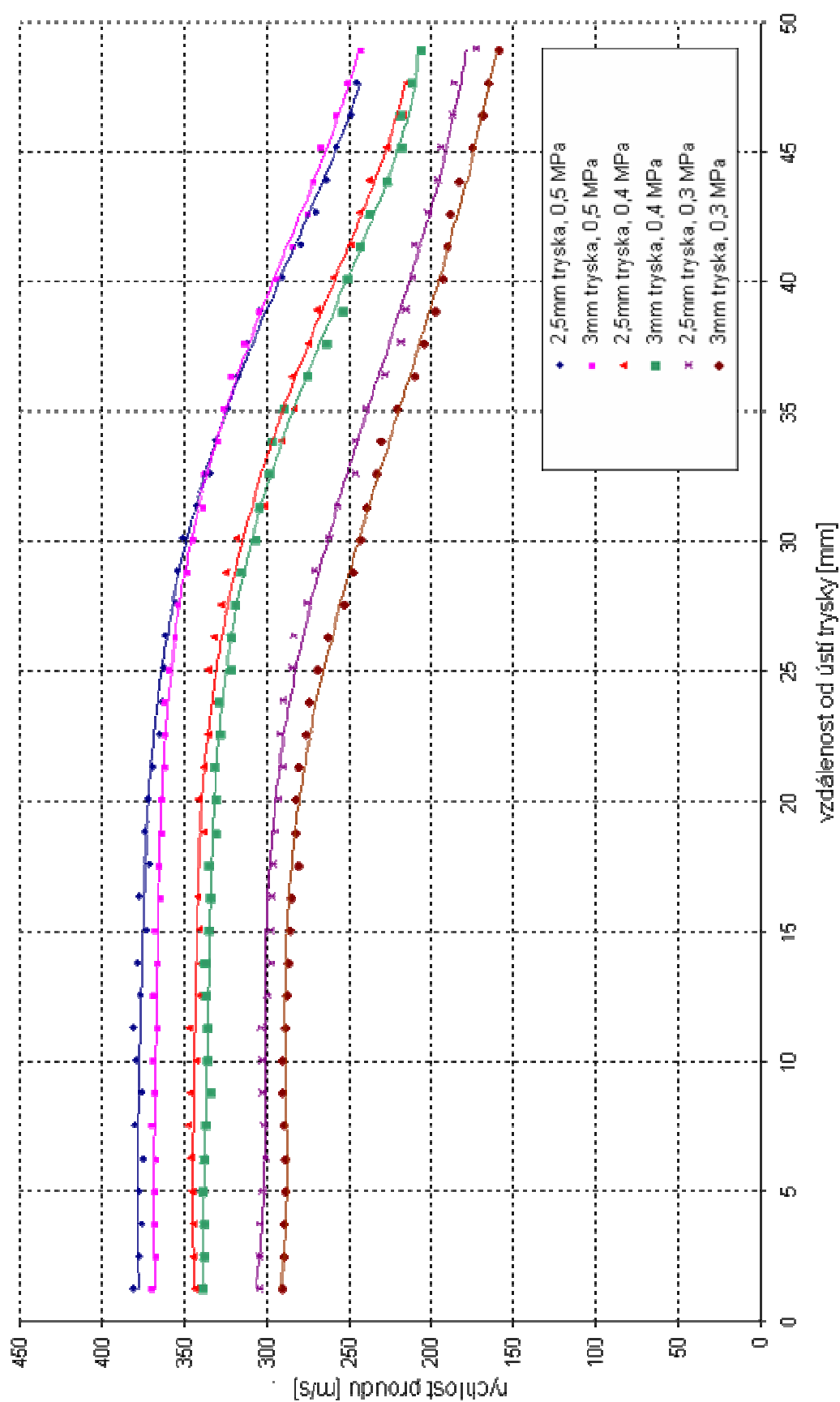
Obr. 40 Kontinuální režim - vektorové mapy



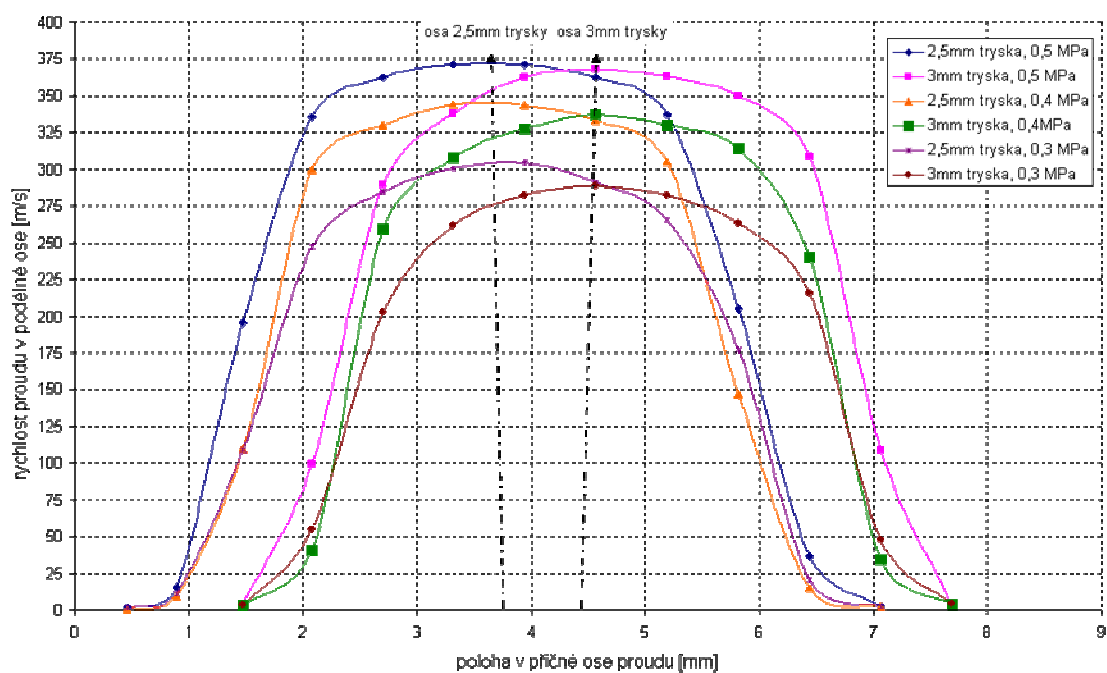
Obr. 41 Kontinuální režim – výskyt drobných vírů

Obr. 42 popisuje závislost poklesu rychlosti proudu na vzdálenosti od ústí trysky. V grafu jsou znázorněna i doplňující měření s různými přetlaky vzduchu. Rychlost u ústí trysky je maximální, do vzdálenosti 25 mm od ústí klesá nepatrně a s přibývajícím vzdáleností pokles rychlosti roste. Zároveň graf vhodně vystihuje závislost rychlosti proudu na nastaveném přetlaku vzduchu. Například pro 2,5mm trysku při zvýšení přetlaku vzduchu z 0,3 MPa na hodnotu 0,4 MPa činí nárůst rychlosti 40 m/s. Takovýto rozdíl rychlostí je v celé zkoumané délce přibližně stejný.

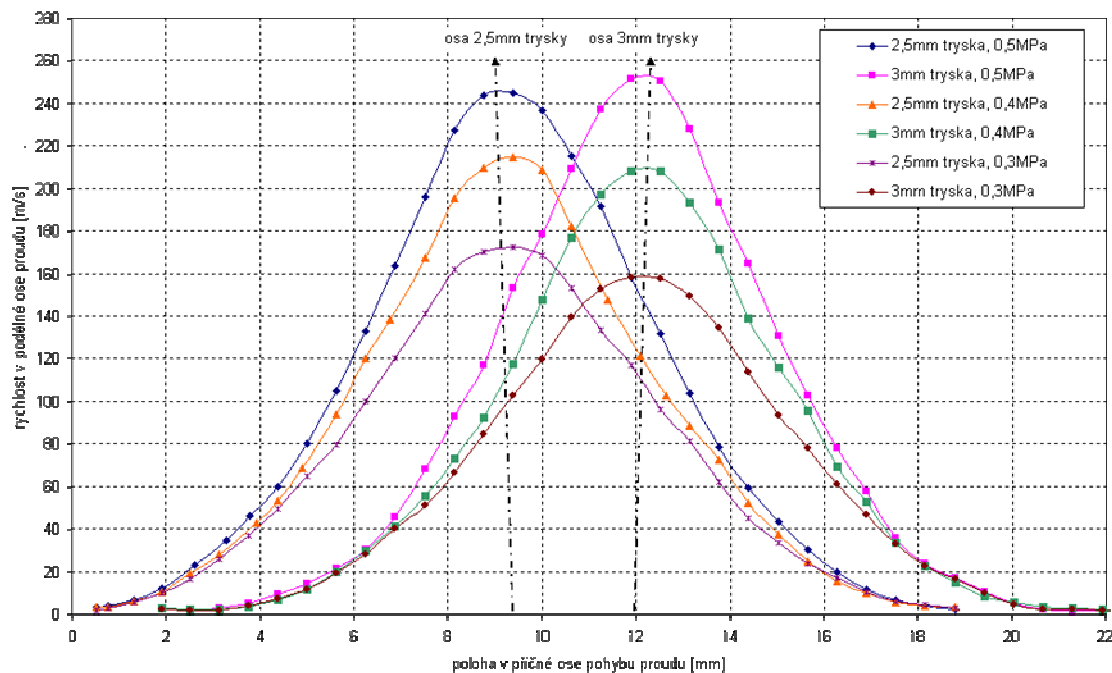
Obr. 43 zobrazuje rychlostní profily proudu ve vzdálenosti 4 mm od ústí trysky. Rychlostní profily jsou zřetelně zploštělé a po okrajích rychlost rychle klesá. Obr. 44 zobrazuje rychlostní profily ve vzdálenosti 48 mm od ústí trysky. Profily jsou více zaoblené a zároveň roste i šířka profilu.



Obr. 42 Pokles rychlosti v podélné ose trysky v závislosti na vzdálenosti od ústí trysky



Obr. 43 Rychlostní profil proudu vzduchu – 4 mm od ústí trysky



Obr. 44 Rychlostní profil proudu vzduchu – 48 mm od ústí trysky

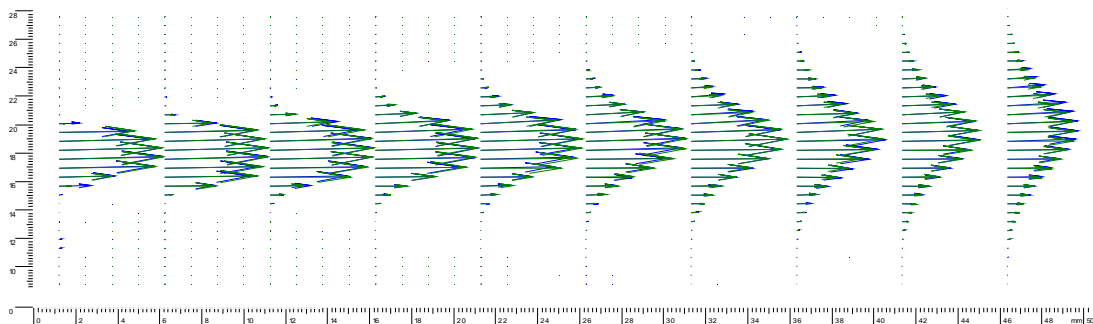
### 3.2.3 Porovnání trysek v kontinuálním a pulzním režimu

Tabulka 1 shrnuje naměřené rychlosti v obou režimech trysky při pracovním přetlaku vzduchu 0,4 MPa. V kontinuálním režimu má 2,5mm tryska o 10 m/s vyšší rychlost proudu než 3mm tryska. V pulzním režimu v oblasti ustálení jsou rozdíly rychlostí trysek zanedbatelné. Rozdíl rychlostí trysek v porovnání v kontinuálním a pulzním režimu činí pro 2,5mm trysku 1% odchylku u 3mm trysky je odchylka 3%.

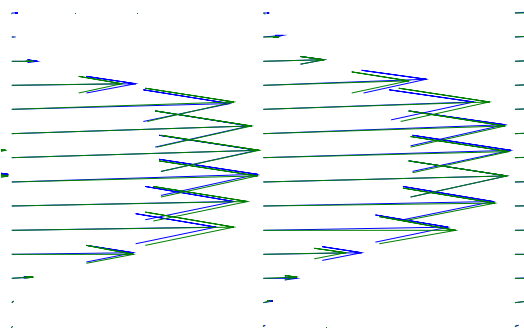
Tabulka 1 Porovnání rychlostí proudu v kontinuálním a pulzním režimu

	tryska	v [m/s]
<b>kontinuální režim</b>	2,5 mm	348
	3 mm	338
<b>pulzní režim (ustálení)</b>	2,5 mm	346
	3 mm	346

Na Obr. 45 je porovnán rychlostní profil proudu v kontinuálním (modře) a pulzním režimu (oblast ustálení proudu, zeleně). Proudové profily mají téměř identický charakter. Pro názornost je na Obr. 46 provedeno zvětšení profilu.



Obr. 45 Porovnání rychlostních profilů v kontinuálním a pulzním režimu



Obr. 46 Porovnání shodnosti proudových profilů (výřez)

## 3.3 Doplnující měření

V následujících podkapitolách jsou popsány výsledky doplňujících měření. Jedná se zejména o měření pomocí metody LDA a BSA, měření rychlosti pohybu útkové nitě a pokles teploty vzduchu za ústím tkací trysky.

### 3.3.1 Výsledky měření LDA

Metoda LDA byla vybrána pro ověření výsledků metody PIV. Měřicí systém je zobrazen na Obr. 47.



Obr. 47 Sestava pro LDA (1 - laser, 2 - soustava pro vedení laserového paprsku, 3 - optický aparát, 4 - tryska, 5 - traverzér, 6 - ovládání laseru)

Pro měření byl nejprve vybrán optický objektiv s těmito parametry:

- Ohnisková vzdálenost: 401,7 mm
- Průměr čočky: 50 mm
- Úhel mezi paprsky laseru ( $\Phi$ ): 7,12°

Naměřené hodnoty byly odečteny z obrazovky systému Apple a po zprůměrování tří měření jsou zaznamenány v (Tabulka 2).

Tabulka 2 Hodnoty měření s LDA

tryska 2,5 mm		
vstupní přetlak [MPa]	rychlost proudu [m/s]	míra turbulence [%]
0,2	-	-
0,3	302	9
0,4	320	9
0,5	328	9

Výsledné celkem nízké hodnoty rychlostí byly z počátku překvapující. Rozdíl rychlostí u 2,5mm trysky při přetlaku vzduchu 0,5 MPa u LDA metody (328 m/s) je ve srovnání s PIV metodou (375 m/s) 13 %. Vysvětlení lze najít po výpočtu délky optické sondy vybraného objektivu. Pro objektiv s ohniskovou délkou 412 mm výpočtem vychází délka optické sondy 3,5 mm. Tato hodnota je pro tento experiment příliš velká a nedá se tedy hovořit o bodovém měření rychlosti. Velikost optické sondy ale není jediným důležitým parametrem pro výběr objektivu. Je důležité se zamyslet nad dosahovanou maximální dopplerovskou frekvencí a také nad limity užití výpočetní techniky. V následující tabulce je proveden rozbor pro výběr vhodného objektivu s ohledem na velikost optické sondy  $l_m$  a dosahovanou dopplerovskou frekvenci  $f_d$ .

Tabulka 3 Vliv užitého objektivu na velikost optické sondy

parametry objektivu <sup>7</sup>						
číslo obj.	průměr obj. [mm]	ohnisko [mm]	$\theta/2$ [°]	k [m/MHz]	$d_e$ [mm]	$l_m$ [mm]
1	50	250	5,7	2,61	0,14	1,4
2	50	400	3,6	4,14	0,22	3,5
3	50	500	2,9	5,16	0,27	5,5

číslo obj.	rychlost [m/s]	250	300	350	370	400
1	$f_d$ [MHz]	96	115	134	142	153
2		60	72	85	89	97
3		48	58	68	72	77

<sup>7</sup>  $\theta/2$  ... úhel protínajících se laserových paprsků

k ... pomocná konstanta objektivu

$d_e$  ... průměr fokusovaného laserového paprsku

$f_d$  ... dopplerovská frekvence



Po výpočtech byl vybrán jako vhodný objektiv s následujícími parametry:

- Ohnisková vzdálenost: 250 mm
- Průměr objektivu: 50 mm
- Délka optické sondy: 1,4 mm
- Dopplerovská frekvence (pro  $v=350$  m/s): 134 MHz

Měření s tímto objektivem nebylo realizováno z důvodu rozebrání trysky pro studium vnitřní geometrie sestavy trysky a ejektoru. Po opětném sestavení došlo ke změně nastavení polohy ejektoru vůči plášti trysky. Přesná kalibrace trysky nebyla ve školní laboratoři možná.

### 3.3.2 BSA Flow software

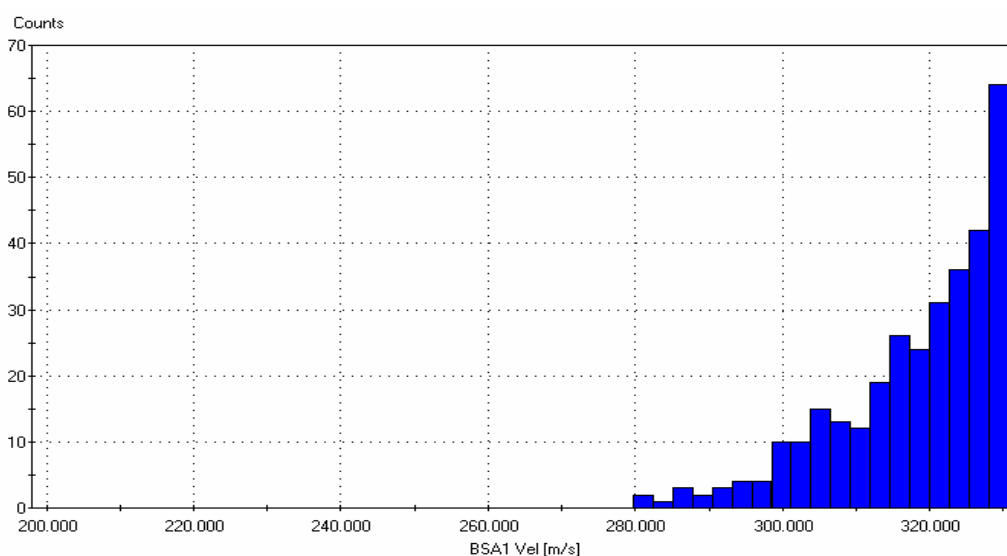
Tento systém byl zprovozněn z potřeby získání grafických výsledků měření na LDA (měření probíhalo paralelně s LDA) a k následnému porovnání hodnot s PIV měřením.

U této metody se projevilo omezení vlivem použitého objektivu a frekvenčního maxima analyzátoru. Maximální měřitelná rychlost je omezena na hodnotu 330 m/s vlivem maximální frekvence analyzátoru. Tato hodnota vyplývá z následujícího:

- Maximální frekvence analyzátoru: 80 MHz
- Vlnová délka laserového paprsku: 514,5 nm
- Úhel paprsků objektivu  $\vartheta=7,12^\circ$
- Ohnisko užitého objektivu: 400 mm

Tabulka 3 potvrzuje, že tato měřicí sestava je schopna s užitým objektivem měřit velikost rychlosti pouze do výše uvedené hodnoty 330 m/s. Použitím objektivu s větší ohniskovou vzdáleností by se tomuto omezení zamezilo (pokles dopplerovské frekvence), ovšem opět by se projevily nedostatky dané velikostí optické sondy (s rostoucím ohniskem objektivu roste i velikost optické sondy).

Obr. 48 představuje histogram rychlostí získaný metodou BSA při měření 2,5mm trysky s přetlakem vzduchu 0,4 MPa. Na obrazu je patrný nárůst rychlostí až do limitu výpočetní techniky 330 m/s.



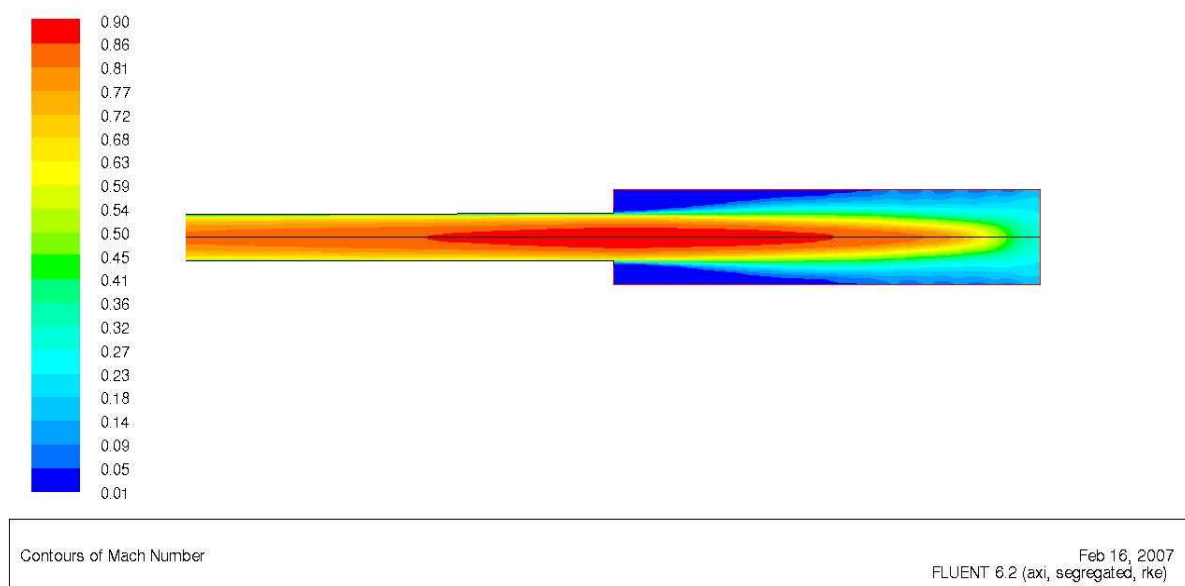
Obr. 48 Rychlostní spektrum proudu s využitím LDA-BSA Flow software

### 3.3.3 Výsledky simulací FLUENT

Speciálně pro tuto trysku byly vytvořeny počítačové simulace v programu Fluent. Tento software je moderní CFD program umožňující komplexní řešení úloh z oblasti proudění a spalování. Je možné zkoumat laminární i turbulentní oblasti, provádět výpočty vícefázového proudění, proudění s chemickými reakcemi (například hoření) spolu s přenosem tepla. Program umožňuje následnou kvalitní vizualizaci výsledků.

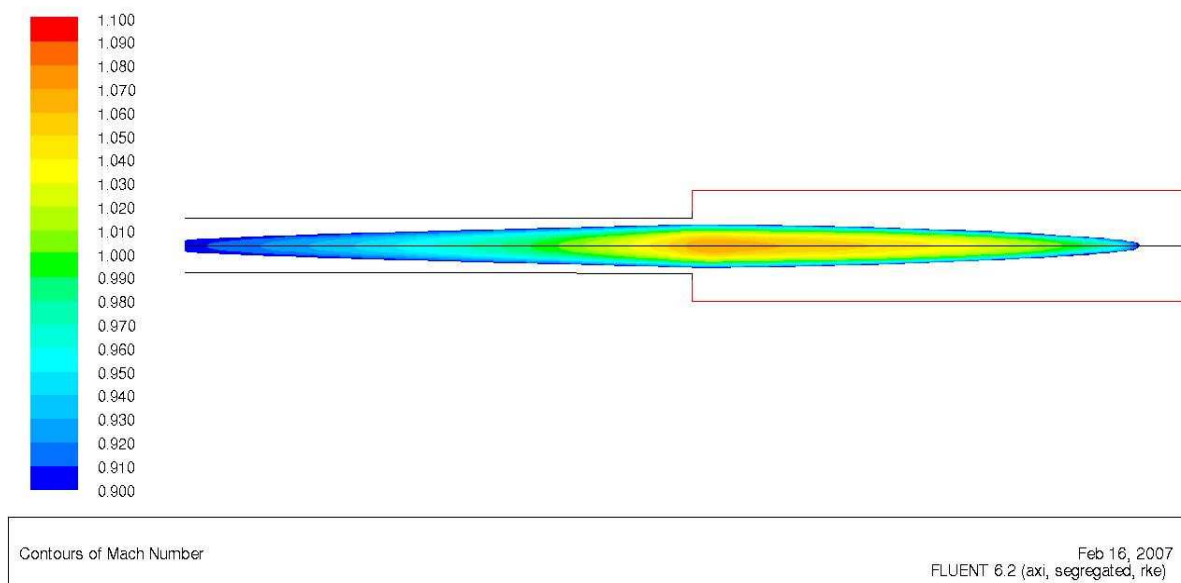
Simulace byly prováděny s parametry uvedenými v názvech pod příslušnými obrázky. Uvedený model je simulován s posuvem středové části 1 mm od pláště. Autorem simulací je prof. Adámek Karel z TUL, podrobné informace viz [8].

Obr. 49 představuje průběh rychlosti proudu vzduchu u ústí 2,5mm trysky při tlaku přívodního vzduchu 0,5 MPa. Rychlost v trysce se směrem k ústí nepatrně zvyšuje. Těsně za ústím trysky proud vzduchu expanduje do okolí a rychlost nabírá nejvyšších hodnot až 0,9 Ma.



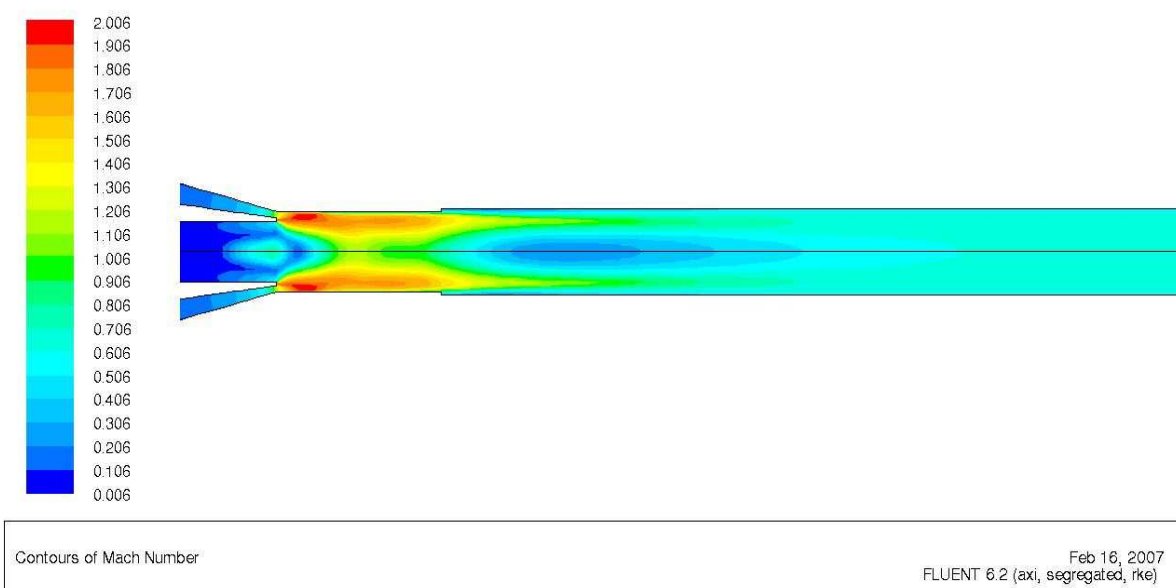
Obr. 49 Fluent - Průběh rychlostí v ústí 2,5 mm trysky, přívodní tlak 0,5 MPa [8]

Na následujícím obrázku (Obr. 50) je znázorněn také proud vzduchu vystupující z trysky, ovšem v tomto případě byla situace simulována s parametrem 0,7 MPa přetlaku vstupního vzduchu. Zde se již vyskytují rychlosti až 1,1 Ma těsně za ústím trysky. Tato simulace tedy potvrzuje možný výskyt nadzvukových rychlostí pohybu proudu vzduchu.

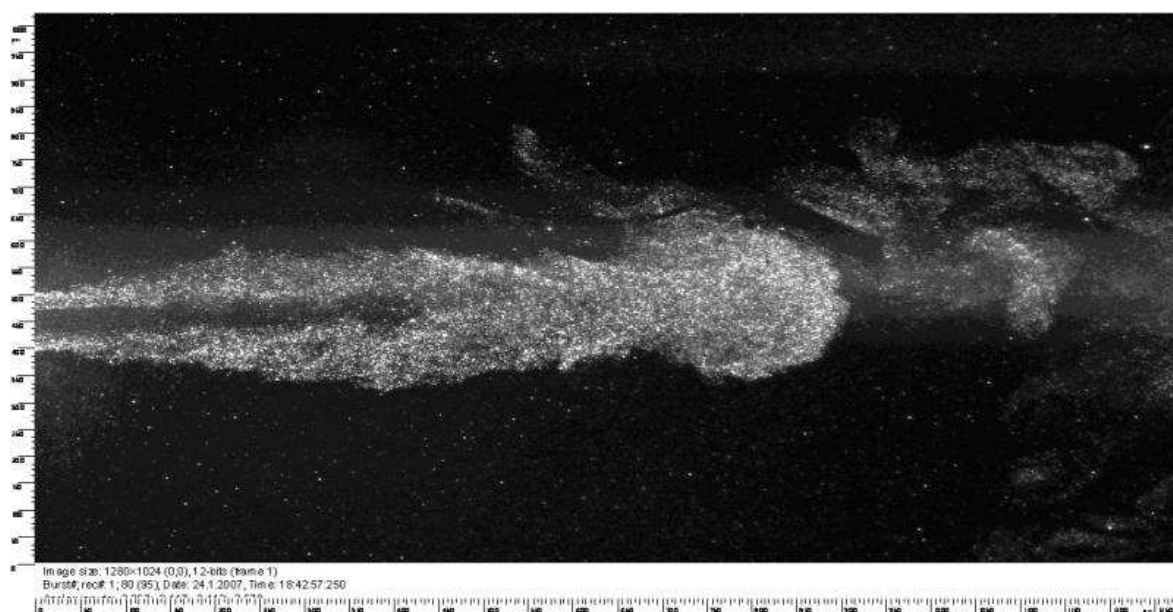


Obr. 50 Fluent - Průběh rychlostí v ústí 2,5mm trysky, přívodní tlak 0,7 MPa[8]

Poslední obrázek vybraný z provedených simulací (Obr. 51) charakterizuje chování proudu vzduchu uvnitř trysky za ústím ejektoru (dva bílé shodné trojúhelníky). Vnitřní modrá barva uvnitř tělesa ejektoru zastupuje nasávaný proud vzduchu z okolí trysky. Tento proud je ejektorovým jevem strháván a následně urychlován vstupním tlakovým proudem vzduchu. Zajímavé jsou dva následující jevy. Prvním je výskyt rychlostí až dvojnásobně vyšších než rychlost zvuku. Druhým jevem je tvorba oválné části uvnitř trysky, jejíž rychlost je nižší než rychlost vzduchu jí obtékající. Zřejmě právě tento obrázek je klíčový pro vysvětlení bezčásticové oblasti uvnitř proudu, která je zachycena na Obr. 52. Uvedený záznam je pořízen v pulzním režimu při rozběhu proudu vzduchu. Jev se vyskytuje na záznamech u obou trysek v časovém intervalu zhruba 16 až 18 ms po otevření ventilu. Proud vzduchu v tomto čase nabírá rychlost od 60 do 200 m/s. Animace tohoto jevu je na přiloženém CD.



Obr. 51 Fluent – Průběh rychlosti uvnitř 2,5mm trysky v ústí ejektoru, 0,7 MPa [8]



Obr. 52 Bezčásticová oblast uvnitř proudu

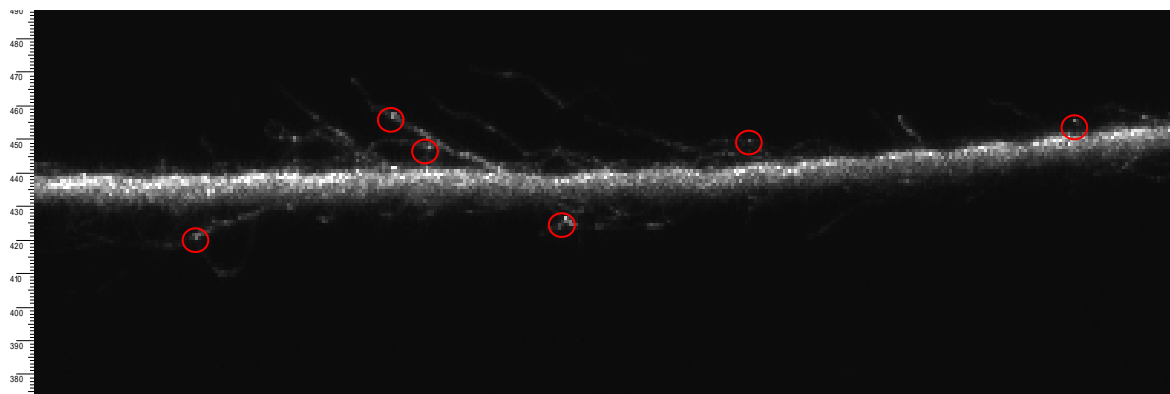
### 3.3.4 Měření rychlosti útku

Tato část byla provedena nad rámec zadání. Cílem bylo experimentálně určit rychlost útku, který je nesen proudem vzduchu z tkací trysky. Měření probíhalo na 2,5 mm trysce při vstupním přetlaku 0,4 MPa.

Při experimentu se zkoušelo využít synchronizace měřicího systému a ovládání solenoidu trysky. Očekával se efekt, kdy řízeným sepnutím elektromagnetu by byl útek protažen proudem vzduchu tryskou a následnou korekcí doby zpoždění (viz. kap. 2.1.3) by se docílilo zaznamenání obrazu s nití. Vlivem vysoké náhodnosti zachycení útku v obraze se od tohoto postupu upustilo a rychlost se určovala v kontinuálním režimu.

Ovšem i při stálém proudění vzduchu tryskou je pořízení obrazu zaznamenávající útek v letu velmi nahodilým procesem a bohužel také málo pravděpodobným. Zhruba z třiceti pokusů zachytávání obrazu zhruba 1,5 m dlouhé nitě se podařilo pořídit pouhé tři obrázky vhodné pro další úpravy. K tomuto faktu je tedy nutné brát zřetel při posuzování výsledných rychlostí. Určování rychlosti letu útkové nitě bylo provedeno dvěma postupy.

První postup znamenal z několika pořízených záznamů vybrat několik bodů nitě, snadno identifikovatelných v počátečním i koncovém záznamu dvojobrázků. Časová prodleva expozic je přesně definována experimentátorem. Hodnoty poloh se zanesly do tabulky a ze známého vztahu se určila rychlost pohybu těchto bodů. Pro každý soubor naměřených rychlostí příslušejících k jednomu dvojzáznamu se udělal aritmetický průměr rychlosti. Toto se opakovalo pro všechny tři záznamy. Rychlost letu útkové nitě při zvolených podmínkách se pohybuje kolem hodnoty 70 m/s. Detailní rozbor je v (Tabulka 4).



Obr. 53 Detail vláken zaznamenané nitě - vybrání vhodných pixelů pro určení rychlosti

Tabulka 4 Rychlost útkové nitě<sup>8</sup>

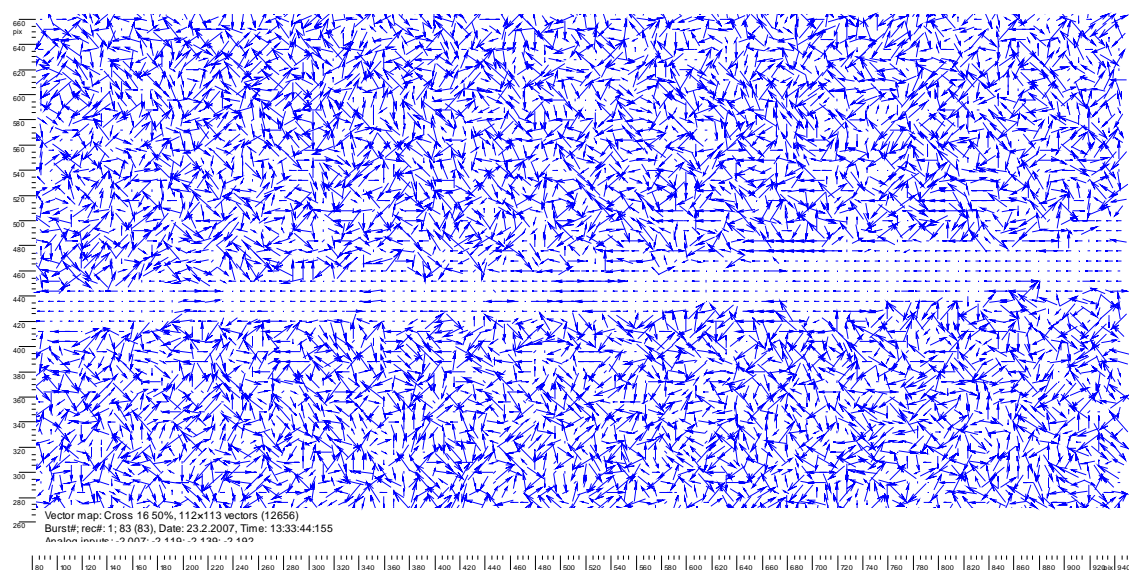
<b>záznam 1, t=0,00002 s</b>		
<b>X1 [mm]</b>	<b>X2 [mm]</b>	<b>v [m/s]</b>
2,5	1,2	65
17,0	15,6	70
20,1	18,7	70
37,2	35,5	85
42,4	41,1	65
<b>průměrná rychlost</b>		<b>71</b>

<b>záznam 2, t=0,0000015 s</b>		
<b>X1 [mm]</b>	<b>X2 [mm]</b>	<b>v [m/s]</b>
1,0	0,9	67
7,3	7,2	67
28,2	28,1	67
35,4	35,3	67
43,5	43,4	67
<b>průměrná rychlost</b>		<b>67</b>

<b>záznam 3, t=0,00001 s</b>		
<b>X1 [mm]</b>	<b>X2 [mm]</b>	<b>v [m/s]</b>
3,1	2,3	80
5,8	5,1	70
23,2	22,6	60
34,8	34,1	70
47,2	46,5	70
<b>průměrná rychlost</b>		<b>70</b>

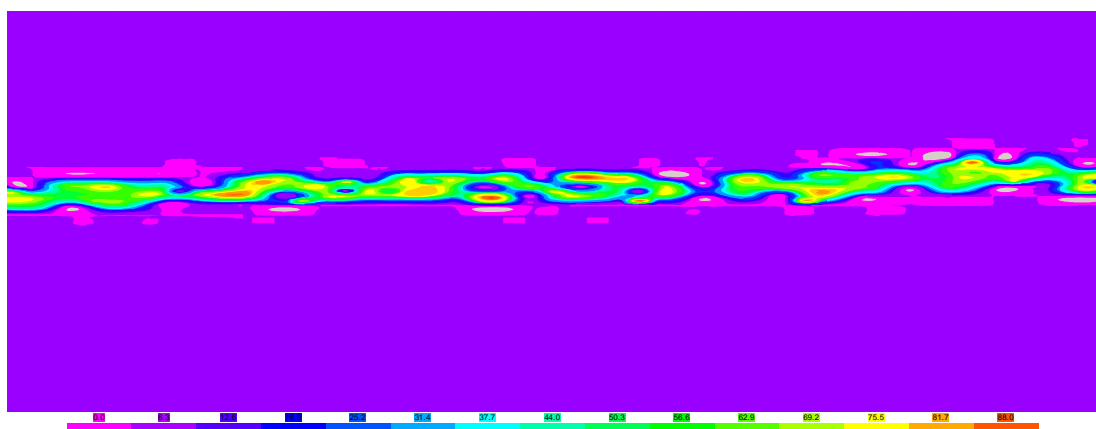
<sup>8</sup> Odečteme-li od sebe pro každý bod výchozí a konečnou polohu, tj. X1-X2, dostaneme celkovou dráhu, kterou bod v uvedeném čase  $t$  uletěl. Výsledná rychlost následně tedy vyplývá ze vztahu  $v=s/t$ .

Druhý postup měření rychlosti letu útkové nitě je založen na aplikaci korelačních výpočtů na pořízené snímky. Je nutné zdůraznit, že vlivem silného odrazu laserového světla od nitě musela být velmi snížena intenzita laserového paprsku. Toto mělo ovšem za následek potlačení odrazu světla od stopovacích částic. Na Obr. 54 je zobrazena zatím nijak nezpracovaná korelační mapa. Mapa obsahuje většinu chybných vektorů, ale také prázdnější pás, kde se nachází útková nit.



Obr. 54 Korelace pořízeného obrazu s útkem

Vhodnou úpravou, spočívající například v zamaskování oblastí chybných vektorů, lze dosáhnout výsledných skalárních map znázorněných pro ukázkou na Obr. 55. V těchto podkladech se vyskytují místa s rychlostmi až 88 m/s, ale převládající rychlost leží v oblasti 60 až 70 m/s. Oba postupy měření rychlosti pohybu útkové nitě se tedy téměř shodují.



Obr. 55 Skalární mapa rychlostí letu útkové nitě



## ◆ Kapitola 4

### Závěr

V teoretické části diplomové práce byly popsány základní poznatky o laserových anemometriích a krátce vysvětlen princip pneumatického prohozu útkové nitě prohozním kanálem tkacího stroje. Diplomová práce ukázala možnosti metody PIV pro experimentální výzkum stacionárních i výrazně nestacionárních proudových.

Z nastudovaných materiálů bylo sestaveno experimentální uspořádání systému PIV pro měření proudových polí za průmyslově užívanou tkací tryskou fy. TE STRAKE. Tryska byla měřena ve stacionárním i nestacionárním režimu proudění vzduchu. Výsledky a provedené vizualizace popisují vývoj proudu v čase, znázorňují počáteční kompaktnost a následný rozpad jádra proudu, zaznamenávají dosažené rychlosti pohybu proudění a ukazují mapy vířivostí v jednotlivých oblastech proudu.

Ve stacionárním režimu při nastavených pracovních podmínkách (přetlak 0,4 MPa) dosahovala rychlost proudu vzduchu u 2,5mm trysky průměrné hodnoty 348 m/s. Pro stejné vstupní parametry platí pro 3mm trysku rychlost 338 m/s. Z důvodu výskytu lehce nadzvukových rychlostí se experiment zaměřil i na výzkum chování proudu vzduchu při vyšším vstupním tlaku. Po nastavení vstupního přetlaku na 0,5 MPa byly zaznamenány rychlosti až 390 m/s u 2,5mm a 377 m/s u 3mm trysky.

Měření v pulzním režimu popsala časový vývoj proudu v pracovní periodě tkací trysky. Získané výsledky jsou důležité pro synchronizaci tkacího procesu. Dle těchto parametrů lze nastavit předstih otevření elektromagnetického ventilu, samotnou dobu otevření ventilu a následnou synchronizaci se stříhacím zařízením a zbytkem tkacího systému s přesností na jednotky milisekund. Rychlost proudu vzduchu u obou trysek v ustáleném stavu byla vyrovnána (346 m/s). Časový vývoj proudu je u 3mm trysky o 2 ms opožděný ve srovnání s 2mm tryskou.

Nad rámec zadání diplomové práce bylo provedeno několik dalších doplňujících měření. Pro ověření dosažených výsledků využita metoda LDA a následně i BSA. Obě metody nedosáhly očekávaného přínosu. Výsledky z LDA byly neakceptovatelné vlivem nevhodného optického objektivu (příliš velká optická sonda vzhledem k charakteru zkoumaného proudění). U metody BSA se projevil limit užití výpočetní techniky.

Proveden byl také okrajový výzkum rychlosti letu útkové nitě uvnitř nosného proudu vzduchu. Z několika pořízených záznamů útku v kontinuálním režimu proudění byla vyhodnocena rychlost pomocí dvou postupů. První algoritmus spočíval ve výpočtu rychlosti ze změny polohy vybraných bodů záznamů v definovaném časovém intervalu. Druhý výpočet spočíval v zamaskování obrazu v okolí nitě a následném provedení vzájemné korelace a provedení validace výsledných vektorových map. Oba postupy dosáhly podobných rychlostí pohybu útkové nitě.

Diplomová práce splnila všechny body zadání. K dokumentu je přiloženo CD obsahující vybrané databáze pořízených záznamů v obou režimech proudění vzduchu. Na médiu jsou také umístěny výsledky korelací, všechny provedené skalární mapy i vytvořené animace vývoje proudu v jedné pracovní periodě pulzního režimu.

## Použitá literatura

- [1] Kopecký, Václav. *Laserová anemometrie v experimentální mechanice tekutin*. TU Liberec 2004. Učební texty.
- [2] Kopecký, Václav. *Využití laserové dopplerovské anemometrie při vývoji tryskových tkacích strojů*. Jemná mechanika a optika 10/98, ročník 43, str. 303 – 307.
- [3] Kopecký, Václav. *Aplikace laserové dopplerovské anemometrie na měření proudových polí vzduchového prohozu tryskového tkacího stroje*. Liberec, 1993. Kandidátská disertační práce.
- [4] Rafel, M., Willert, C., Kompenhans, J. *Particle Image Velocimetry*. Springer. ISBN 3-540-63683-8.
- [5] DANTEC DYNAMICS. *FlowMap Particle Image Velocimetry Instrumentation*. Denmark, Tonsbaken, 2000.
- [6] DANTEC DYNAMICS. Firemní podklady. [on-line][cit. 12. 3. 2007]. Dostupné z WWW: <<http://www.dantecdynamics.com>>.
- [7] SCITEK Consultants Ltd. Firemní podklady. [on-line] [cit. 12. 3. 2007]. Dostupné z WWW: <<http://www.scitekconsultants.co.uk/products/ls/index.htm>>.
- [8] Adámek, Karel. *Hlavní tryska TE STRAKE*. Liberec 2007. Výsledky interních simulací.